



TITLE:

大気圧下の小口径円管内強制流動
沸騰に関する研究(Dissertation_全
文)

AUTHOR(S):

呉田, 昌俊

CITATION:

呉田, 昌俊. 大気圧下の小口径円管内強制流動沸騰に関する研究. 京都大学, 1997, 博士(工学)

ISSUE DATE:

1997-11-25

URL:

<https://doi.org/10.11501/3131545>

RIGHT:

博士学位論文 (京都大学)

大気圧下の小口径円管内
強制流動沸騰に関する研究

1997年6月

呉田昌俊

目次

第1章 序論 ----- 1

§ 1. 1. はじめに ----- 1

§ 1. 2. 従来の研究 ----- 3

§ 1. 3. 本研究の目的と論文の構成 ----- 7

第2章 小口径円管内強制流動沸騰実験 ----- 10

§ 2. 1. 緒言 ----- 10

§ 2. 2. 安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰 ----- 11

2. 2. 1. 実験装置 ----- 11

2. 2. 2. 実験条件 ----- 13

2. 2. 3. 測定値から諸物理量の計算 ----- 14

2. 2. 4. 実験結果 ----- 15

(1) 圧力損失特性 ----- 15

(2) 熱伝達特性 ----- 20

(2. 1) 管内径が熱伝達特性に及ぼす影響 ----- 22

(2. 2) 質量速度が熱伝達特性に及ぼす影響 ----- 22

(2. 3) 加熱部入口からの距離が熱伝達特性に及ぼす影響 ----- 22

(3) 限界熱流束特性 ----- 22

(3. 1) 管内径が限界熱流束に及ぼす影響 ----- 23

(3. 2) L/D が限界熱流束に及ぼす影響 ----- 25

(3. 3) 入口サブクール度が限界熱流束に及ぼす影響	26
(4) 可視化実験	26
(4. 1) 試験部と観察方法	26
(4. 2) 観察結果	27
§ 2. 3. 不安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰	29
2. 3. 1. 実験装置	29
2. 3. 2. 実験条件	29
2. 3. 3. 流量が一定で熱流束が上昇する場合の変動特性	30
(1) 圧力と壁面温度の変動特性	30
(2) 限界熱流束特性	31
2. 3. 4. 熱流束が一定で流量が低下する場合の変動特性	31
(1) 圧力と壁面温度の変動特性	31
(2) 限界熱流束特性	31
2. 3. 5. 不安定流動発生領域	32
2. 3. 6. 限界熱流束の低下と不安定流動の関係	33
§ 2. 4. 結言	33
 第3章 小口径円管内強制流動熱伝達	 53
§ 3. 1. 緒言	53
§ 3. 2. 液単相強制対流領域の壁面熱伝達特性	53
3. 2. 1. 既存の熱伝達率相関式の評価	53
3. 2. 2. Dittus-Boelter式の修正式の評価	55
3. 2. 3. 加熱部入口からの距離が液単相強制対流熱伝達に及ぼす影響	56
§ 3. 3. 核沸騰開始条件	57
§ 3. 4. 核沸騰領域の壁面熱伝達特性	58
3. 4. 1. 既存の熱伝達率相関式の評価	58
3. 4. 2. 小口径円管内飽和核沸騰熱伝達用相関式の評価	62
§ 3. 5. 小口径円管での興味深い壁温変動	62
§ 3. 6. 結言	63

第4章 小口径円管内強制流動沸騰バーンアウト	70
§ 4. 1. 緒言	70
§ 4. 2. バーンアウトの発生機構別分類	70
§ 4. 3. バーンアウト発生機構別バーンアウト・発生メカニズムの考察	73
(1) フラッディング型のバーンアウト	73
(2) ドライアウト型のバーンアウト	73
(3) DNB型のバーンアウト	74
§ 4. 4. 既存の限界熱流束相関式およびモデル式の適用性の評価	75
4. 4. 1. ドライアウト型バーンアウト領域	75
(1) 実験相関式の適用性の評価	75
(2) 三流体モデルに基づく数値解析コードの適用性の評価	79
4. 4. 2. DNB型バーンアウト領域	81
(1) 実験相関式の適用性の評価	81
(2) 機構論的モデルの評価	87
(2. 1) Kattoモデルの適用性の評価	87
(2. 2) Celataモデルの適用性の評価	93
(2. 3) Weisman-Peiモデルの適用性の評価	97
(2. 4) 従来のモデル内で計算される物理量の比較	101
§ 4. 5. 結言	102
 第5章 不安定流動時の小口径円管内沸騰流の熱水力特性	 122
§ 5. 1. 緒言	122
§ 5. 2. 数値解析モデル	122
§ 5. 3. 構成式の評価	123
5. 3. 1. 壁面摩擦モデルの評価	123
5. 3. 2. 壁面熱伝達率モデルの評価	125
§ 5. 4. 数値解析結果と実験結果の比較	126
5. 4. 1. 熱流束上昇に伴う不安定流動現象の数値解析結果と評価	127
5. 4. 2. 流量低下に伴う不安定流動現象の数値解析結果と評価	128

5. 4. 3. 不安定流動発生領域の予測と評価	129
§ 5. 5. 不安定流動発生時の熱水力挙動に関する考察	129
§ 5. 6. 結言	131
第6章 総括	139
使用記号	144
参考文献	146
発表論文・国際会議等 一覧	156
謝辞	157
Appendix A	
“ A DATA SET OF CRITICAL HEAT FLUX FOR FLOW-BOILING OF WATER IN SMALL-DIAMETER TUBES UNDER LOW-PRESSURE CONDITIONS ”	159
Appendix B	
“ COMPARISON BETWEEN PRESENT DATA AND THE EXISTING CORRELATIONS AND MODELS ”	201
Appendix C	
“ FIGURE CONCEPTUAL VIEW OF THE DNB TYPE BURNOUT MODELS ”	205

第1章 序論

§ 1. 1. はじめに

現在、科学技術はより高度に成長を続けている。その中でも先端的な技術機器である高出力加速器、核融合炉機器、大型放射光装置、高性能半導体素子等は、その性能の向上に伴い従来の冷却技術をはるかに超える高い熱流束を定常的に発する。そのため、高性能化・高出力化の限界が、除熱技術の限界で決定されるケースが多い。現在までになされている除熱研究の多くが、原子炉やボイラーに代表される大型システムを対象とした研究であり、研究対象とされていた熱流束は、高くても数MW／㎡程度であった。しかし、核融合炉のダイバータやリミッタなどのプラズマ対向機器(Fusion Eng. And Des. ；1993)(Araki ；1989, 1992)、そして中性粒子ビーム入射装置は、片面から定常的に高エネルギー粒子の入射があり表面熱流束は5 MW／㎡を超える(Yoshikawa ；1990)(Araki ；1990)(Kuriyama ；1989)。また、高出力加速器のビームダンパやファラデカップ、大型放射光装置のモノクロメータ等先端機器は、受熱面が数c㎡以下の小面積に3 0 MW／㎡を超える超高熱流束を継続して受ける。高レベル放射性物質の消滅処理を目的とするオメガ計画に使用される大強度陽子加速器のビーム強度は1. 5 GeV、ビーム出力が1 5 MW、ビーム断面の直径は約1 c mで計画されている(Mizumoto ；1996)。そして、現在実験に用いられているイオン出力測定装置でも1 c㎡以下の受熱面に3 0 MW／㎡以上の高熱流束を受け、実機では3 0 0 MW／㎡に達する案もある。その他、大型放射光装置の受熱部はビームを縦に広げ、1 c m×5 c m程度の面積に1 5 MW／㎡以上の熱負荷を受ける。このような先端機器の高性能化・高出力化を達成するためには、小面積受熱面に高熱負荷という厳しい環境条件下での除熱技術の確立、そして、異常時の安全性を評価する手法の確立が必要とされている。そして、これらの先端機器の前提となるデータベースは工学的に実証されている必要がある。しかし、現在データベースは不足しており、従来の実証済みの技術では設計条件をカバーしきれない。そのため、高熱流束下でのデータベースを整備し、除熱技術や熱工学的設計手法、そして異常時の評価手法の確立が急務となっている。

この困難を打破するために、近年多くの高熱流束技術に関する研究が進められている。特に核融合炉プラズマ対向機器の冷却技術の早期確立が、国際熱核融合実験炉(ITER)計画の実現、また次世代核融合実証炉の設計のため急務となっており、他の機器に比べ工学的研究が進んでいる。

そこで、近年報告されている核融合炉のダイバータ板の冷却を想定した各種の高熱流束

研究を簡単にまとめ、これを以下に記す。

- (1) 小口径円管や狭間隙流路内での高流速・高サブクール水による強制対流沸騰を利用した水冷却による高熱流束化促進技術(呉田 ; 1994, 1995)(Ornatskii ; 1965)(Inasaka ; 1987)(Celata ; 1994)(Vandervolt ; 1994)(数土 ; 1996, 1997)
- (2) スワールテープを円管流路に挿入して旋回流にすることにより、限界熱流束を高める技術(Araki ; 1989)(Celata ; 1994)(成合ら ; 1992, 1994, 1995)
- (3) ハイパーベーパーロンに代表されるような特殊フィン付き伝熱面を流路内面に有することにより高熱流束除熱を達成する技術(Baxi ; 1993)(Cattadori ; 1993)(Kovalev ; 1976)
- (4) 水の衝突噴流冷却により衝突点近傍で高熱流束除熱を達成する技術(Koshelev ; 1985)(Faggiani ; 1990)
- (5) スプレーによりミスト滴を伝熱面に供給するミスト冷却による高熱流束除熱技術(戸田 ; 1973)(Kopchikov ; 1978)(Grimley ; 1988)
- (6) 管状流路にフィンを付け拡大伝熱面効果により高熱流束除熱をヘリウムガス冷却で達成させる技術(Baxi ; 1993)
- (7) 液体金属ミスト衝突噴流冷却技術(Toda ; 1985, 1988)(Mori ; 1992)
- (8) 固気混相衝突噴流冷却技術(清水 ; 1959)

以上のような各種高熱流束除熱技術が近年精力的に研究されている。そして、各種技術とも核融合炉機器の工学的設計基準を満足するレベルに近づきつつある。

このように各種冷却方法が考案され、核融合炉の運転条件に近い条件で実験がなされ実証データの蓄積が進められている。しかし、大強度加速器のターゲット系の除熱は、小面積に高エネルギー入射があるため冷却系はコンパクトである必要があり、真空容器近傍に設置されることから低圧下で運転される必要がある。しかし、このような体系を研究対象としている研究報告はきわめて少ない。

そこで、本研究では、小面積の冷却部に高熱流束負荷がかかるような体系を研究の対象として選び、2次流れを考慮する必要のない基本的形状である小口径でかつ比較的加熱部長さが短い円管内の熱水力特性、およびバーンアウトに関する研究を、大気圧下の流動安定時と不安定時の両面から進めることにした。小口径で短い円管を研究体系として選んだ理由は、熱工学的設計等の基礎データとして極めて重要であるとともに、超高熱流束除熱が達成されやすい体系である(参照: Ornatskii ; 1965)と考えられたためである。また、本研究では、従来多くの研究がなされている寸法から、管内径および加熱長を順に小さく

することとし、熱流束範囲も低熱流束から超高熱流束までの広範囲にわたり各特性を系統的に明らかにすることとした。

小口径円管内の二相流は、表面張力の影響を受け、通常口径円管内での流動様式と異なることが予想される。例えば、管内径が5 mm以下になると管内静止水中の気泡上昇速度が0になることが報告されている(Gibson ; 1913)(Zukoskii ; 1966)(Tung ; 1976)。そして、小口径円管内強制流動二相流の場合も、流動様式、圧力損失特性、ボイド率、スラグ気泡の上昇速度等二相流特性が通常口径円管の特性と異なることが予想される。

近年、小口径円管内や狭間隙流路内断熱二相流に関する研究がいくらかなされ、流動特性、圧力損失特性、ボイド率等が明らかとなってきた(Mishima ; 1996)(Hibiki ; 1993)(Fukano ; 1990, 1993)(Sugawara ; 1967)(Barnea ; 1983)(Biswas ; 1985)(Hijikata ; 1985)(仮屋崎 ; 1992)(Ide ; 1993)(Barajas ; 1993)(森山 ; 1993)。三島ら(Mishima ; 1996)の二相流研究から、水力学的等価直径が10 mm以下、特に6 mm以下の小口径円管で、Chisholmの分布パラメータ(Chisholm ; 1967)が2.1以下の値に変化する等、流動様式が従来多くの研究がなされている管内径が10 mm以上の円管と異なることが分かっている。以後、管内径が6 mm以下の管を小口径円管と呼び、管内径が6 mmより大きい円管を通常口径円管と呼ぶことにする。

小口径円管内での強制流動沸騰時にも、断熱二相流と同様に通常口径円管内での流動様式や伝熱様式と異なることが予想される。

§ 1. 2. 従来の研究

サブクール水による強制冷却は、古くから広く研究がなされてきた(Bergles ; 1981)(Collier ; 1981)(Hsu ; 1986)。Boyd (1985) は、およそ300のサブクール沸騰バーンアウトに関する論文を整理しまとめている。

現在までになされているサブクール沸騰に関する報告は、軽水炉のホットチャンネルの熱設計のためになされたものがほとんどであり、軽水炉の熱流束(0.6 MW/m²)を少し超える1 MW/m²程度の除熱を主な研究対象としていた。そのため、研究対象となるパラメーター範囲は、圧力が約7～15 MPa、冷却水の流速が3～8 m/s、サブクーリングが25～50 K、L/Dが300程度が主であった。

Boyd (1988, 1991)、Koski - Croessman (1988, 1991)、Woolkins ら(1987)は、高熱負荷機器においては、定常的に10 MW/m²を超える熱流束を除熱できるようにする必要があると指摘している。そこでまずは、熱設計や安全評価上最も重要な因子であるバーン

アウトに関して報告されているものの中から、特に本研究と関連性の高いものを以下に記す。

現在までに報告されている最も高い限界熱流束値(C H F)は、Ornatskii ら(1965)によるもので、作動流体には水を用い、管内径が0. 4 mm、加熱部長さが1 1. 2 mm、入口サブクール度が1 5 7 K、流速が9 0 m / s、そして、圧力が 3 2 a t m という条件下で得られた2 2 8 MW / m²という値である。

また、小口径内管に関する研究は、Ornatskii - Kichigen (1962)、Ornatskii - Vinyarskii(1964)、Bergles (1963) によって始められている。そして、Loosmore - Skinner (1965)により、C H F データの要約がなされている。また、C H F データやサブクール沸騰円管用相関式に関する報告をレビューしたものとして、Gambill (1968)、Bergles (1977)、Boyd (1985) そして、Celata (1991)の報告がある。

近年は、Celata - Mariani (1993)により、高熱流束C H F データの編集がなされている。

また、高熱負荷条件下の相関式を評価している報告として、Inasaka ら(1992)、Yin ら(1992)、Celata ら(1994)の報告がある。そして、これらの報告の中で、高流速・高サブクール条件下で適切な予測値を計算できる既存の相関式がないことが記されている。

稲坂ら(1987)は、管内径が1 ～ 3 mmの円管を用いた実験を行い、寸法の影響から高熱流束領域と低熱流束領域に分けている。すなわち、管内径、加熱長が寸法効果としてC H F に及ぼす影響が大きい領域は、一般に熱流束が高いので高熱流束領域（HIGH 領域）と呼び、及ぼさない領域は一般に熱流束が低いので低熱流束領域（LOW 領域）と呼んでいる。そして低いクオリティ・サブクール領域用の Tong の式 (1968)の修正式を提案している。また、Celata ら(1994)は、幅広く実験データを収集し、分析・検討を行い、稲坂らと同様に Tong の式の修正式を提案している。Vandervort ら(1994)は、管内径が0. 3 ～ 3 m mで質量速度が3 0 0 0 k g / m² s 以上の円管内C H F 実験データを収集し、高熱負荷サブクール沸騰C H F 用の相関式を提案している。

なお、上記の研究はいずれもC H F の測定結果から実験相関式を提案しているものであり、これらの報告の中では流動様式など機構論的な議論はなされていない。そして、小口径円管内沸騰時の圧力損失に関する報告は、稲坂ら(1987)の低クオリティ領域での圧力損失特性に関する報告のみであり不明な点が多く残されている。また、同様に熱伝達率特性に関しても報告がなされておらず高熱負荷時の熱特性に関しては未知である。

一般に相関式は、実験データを最小二乗フィッティングさせて作られたものであり、もとなつた実験範囲外への適用は困難である。そこで、近年、サブクール沸騰バーンアウトの発生メカニズムをモデル化し、より広範囲への適用を試みる報告がなされてきた。

サブクール沸騰時のバーンアウトメカニズムを、光学的観察を基に考察した報告に、Tong(1966)、Fiori - Bergles (1970)、Hino - Ueda (1985)、Mattson ら(1973)の報告がある。そして、これらの内容は、Weisman - Ileslamlon (1988)、Lee - Mudawar (1988)、Katto (1992) により再評価されている。これらの評価を簡単にまとめたものを以下に記す。

- (1) 写真等の観察により、加熱壁面近傍に蒸気スラグもしくは薄い蒸気層の存在が確認されていること(Tong ; 1966)(Fiori - Bergles ; 1970)(Hino - Ueda ; 1985)。
- (2) 均等加熱円管においてバーンアウト直前に加熱壁面の温度変動が観察されること(Fiori - Bergles ; 1970)。
- (3) バーンアウト時に、沸騰様式に急な変化が観察されないこと (Mattson ; 1973)。
- (4) 大きな蒸気もしくは蒸気スラグが、壁面近傍の境界層内で小蒸気泡の合体により発生していること。(Hino - Ueda ; 1985)(Mattson ; 1973) 。

そして、上記のような報告をもとにサブクール沸騰条件下のバーンアウト発生機構に関していくつかのモデルが提案されてきた。ここでは、サブクール沸騰条件下の機構論的モデルと呼ばれているものを、基本メカニズムの仮定の違いにより分類し、その違いを記してみる。

- (1) 液層の過熱度限界モデル (Tong ら ; 1965)
このモデルは、壁面近傍の液層内で過熱度限界を超えることにより気泡層への熱伝達が困難となり、バーンアウトに至ると仮定したモデルである。
- (2) 境界層剥離モデル (Kutateladz ; 1966)(Tong ; 1968, 1975)(Pucupile ; 1972) (Hancox ; 1973)(Thorgerson ; 1974)
このモデルは、加熱壁面から液相に向けて蒸気の噴出があると仮定し、蒸気の噴出により壁面近傍の速度境界層の発達が妨げられ剥離するとしている。そして、蒸気の噴出量が限界値を超えると、結果として流れの停滞が発生しバーンアウトに至ると仮定している。しかし、このモデルの仮定と上述の写真等の観察結果に基づく研究報告の内容とは一致せず、物理的基礎が少ないとされている (Celata ; 1994)。
- (3) 液流閉塞モデル (Bergel'son ; 1980)(Smogalev ; 1981)
このモデルは、加熱壁面近傍において、壁面に垂直に流れる液流が、蒸気流により遮断された時にバーンアウトに至ると仮定したモデルである。Bergel'son (1980) は、蒸気と液の境界面での不安定性によって決定される限界速度を仮定し、Smogalev (1981)は、蒸気と液の対向流における運動エネルギーの影響を考慮したモデルを提案している。
- (4) 蒸気移動限界モデル、壁面近傍気泡充満モデル (Hebel ; 1981)(Weisman - Pei ;

1983)(Weisman - Ying ; 1983)(Styrikovich ; 1970)

これらのモデルは、気泡層とバルク液の間での乱流交換が バーンアウト発生の限界を決定すると仮定しているモデルである。バーンアウトは加熱面近傍に充満した蒸気泡が、バルク液の加熱面への流入を防げる時に発生すると仮定している。(Hebel ; 1981) Weisman - Pei (1983)は、気泡層内で均質二相流を仮定し、気泡層内での限界ボイド率 0.82 を超えた時にバーンアウトに至るとし、Weisman - Ying (1983) は、気泡層内でスリップモデルを仮定し、同様に限界ボイド率によりバーンアウトが決定されるとしている。しかし、Styrikovich ら (1970)の研究によるとバーンアウト時のボイド率は、 $0.3 \sim 0.95$ までの範囲で測定されており、蒸気泡充満モデルには疑問がもたれている。

(5) 薄液膜ドライアウトモデル

このモデルは、加熱壁面上を流れる蒸気泡が合体して、蒸気スラグを形成し、その蒸気スラグと加熱面間の薄液膜がドライアウトすることによりバーンアウトに至ると仮定しているモデルである。Lee - Mudawar (1988)モデルは、3つの実験定数以外は、解析的手法により導出された式から構成され、高圧条件下でのCHFデータを高精度で予測している。しかし、低圧条件下でのデータは、モデルの仮定から大きく離れるため、不適切であると報告されている (Celata ; 1994) 。 Katto (1992)は、 $0.1 \sim 20 \text{ MPa}$ という広い圧力範囲に適用できるモデルを提案している。このモデルは Lee - Mudawar モデルと基本的な考え方は同じであるが、初期薄液膜厚さの評価に、プール沸騰の相関式(Haramura ; 1983)を用い、1つの実験定数を実験式で与えている点で異なる。Celata ら(1994)は、Lee - Mudawar モデルや Katto モデルの問題点を示しながらも、薄液膜ドライアウトモデルがサブクール沸騰バーンアウトのメカニズムとして最適であるとし、実験定数を含まない解析的モデルを提案している。このモデルも壁面近傍に蒸気スラグが存在しているとし、このスラグの壁面からの距離は、速度及び温度分布則から導出している。

これらの機構論的モデルは、主に加圧水型軽水炉のパラメータ範囲での使用を想定したものであり、高圧条件下で通常口径管やバンドル体系、そして L/D が 300 程度で予測精度が高い。しかしながら、これらのモデルの小口径円管内バーンアウトへの予測精度は検証がなされていないため、適用性は不明である。高流速・高サブクール条件下では、蒸気泡は非常に小さく、高速に移動するため現在までの光学的手法では正確に現象を捉えることができなかった。そのため、モデル中の構成式を検証することが困難であったためで

ある。

上記のモデルは、サブクール領域や低クオリティ領域用のモデルであったが高クオリティ用のモデルは環状噴霧流から液膜ドライアウトをモデル化したものが一般的であり、沸騰水型軽水炉のバーンアウトを高精度で予測できるレベルにまで完成されている。本研究では、第4章において三流体モデルに基づくF I D A Sコード(Sugawara ; 1990)の適用性を検討することにする。高クオリティ領域用の相関式やモデルまたは数値解析コードの予測傾向と、サブクール領域用の相関式やモデルによる予測傾向を比べると低クオリティ領域でそれぞれの予測傾向の間におおきな不連続が生じる。このような低クオリティ領域での不連続性をなくした統一モデルを近年、児玉(1996)、Kataoka ら(1996)が提案している。これは、高クオリティ領域用の FIDAS コードにサブクール領域用の Katto モデルや Weisman - Pei モデルを組み合わせたもので、高圧条件下の比較的大きい体系で得られたCHFデータを高精度で予測している。

流動が安定している時のバーンアウトに関しては、核融合炉機器の設計と関連し、近年いくつかの報告が上記のようになされてきた。しかし、小口径円管内沸騰流時の圧力損失特性や熱伝達率に関する研究は数少なく(稲坂 ; 1987)、小口径円管内での不安定流動に関する報告も数少ない(梅川 ; 1995)。

§ 1. 3. 本研究の目的と論文の構成

現在、小口径円管内強制流動液単相流および沸騰二相流に関して、稲坂ら(1987)がサブクール領域の圧力損失特性を整理している他は、圧力損失特性や熱伝達特性を記した報告はなされていない。また、広流量範囲にわたり系統的に測定された限界熱流束データベースも不足している。そして、小口径円管内沸騰流の流動様式とバーンアウト発生機構の解明等、現象に基づいた議論は現在までになされていない。高熱流束負荷機器の設計手法を確立するために、小口径円管での圧力損失特性や熱伝達特性、そしてバーンアウトの発生メカニズムを解明する必要がある。

大強度加速器等の高熱流束負荷機器の冷却を考えた場合、真空容器の中や近傍に小型の冷却流路を設置しなければならない状況が多い。このような状況下、冷却システムは低圧で運転されることが望まれている。そこで、本研究では試験部出口圧力を大気圧近傍とし、大気圧近傍での実験データを蓄積し、その結果をもとに議論を行うことにした。

低圧下では水の気液密度差が大きいため、流動の不安定が発生しやすいことが一般的に知られている。しかし、低圧下での不安定流動時の熱水力挙動、そして限界熱流束に及ぼ

す影響に関して明らかにされていない。そこで、冷却装置の異常時も含めた安全評価手法を確立するためには、不安定流動時の熱水力特性、および限界熱流束と不安定流動現象の関係を的確に予測する解析手法を検討する必要がある。

そこで、本研究では、まず高熱負荷となる先端技術機器の熱設計および安全評価に必要となる、(1)小口径円管内強制流動沸騰時の圧力損失特性、熱伝達特性、そして限界熱流束特性を実験により明らかにし、バーンアウトアウト発生機構の分類および考察を行うこと、次に(2)不安定流動時の熱水力挙動、限界熱流束特性、そして、不安定流動発生領域と限界熱流束低下の関係を実験により明らかにし、数値解析的予測手法の検討をおこなうことをテーマとして取り上げた。

そして、次のような研究目標を掲げている。

- (1) 小口径円管内での圧力損失特性を調べ、均質流モデル、及び環状流モデルの適用性を評価する。
- (2) 主要パラメータの熱伝達率に及ぼす影響を調べ、液単相強制対流領域と核沸騰領域の熱伝達特性および核沸騰開始条件を明らかにする。
- (3) 小口径、短加熱部円管に高サブクール水を高流速で流すことにより超高熱流束除熱が可能であることを実証する。
- (4) 主要パラメータの限界熱流束におよぼす影響を明らかにし、限界熱流束データ・ベースを構築する。
- (5) 壁面温度の時間変動と可視化観察をもとに、バーンアウト発生機構を現象論的観点から考察し分類する。そして、それぞれの領域で既存の相関式やモデル式(または数値解析コード)と実験結果を比較し、これらの予測手法の適用性を評価する。
- (6) 圧縮性空間を加熱部入口に接続することにより、小口径円管内で不安定流動を発生させる。この不安定流動発生時の熱水力挙動、限界熱流束特性、そして不安定流動発生領域と限界熱流束の関係を実験により明らかにする。そして、二流体モデルを基礎とした MINI-TRAC コードをドライバーコードとして、小口径円管内不安定流動の数値解析モデルによるシミュレーションを行い、当解析モデルの評価と不安定流動時の熱水力特性を考察する。

本論文は、6つの章から構成されている。以下に各章の概要を述べる。

第1章「序論」では、本研究の背景と本研究の対象について説明し、関連分野における従来の研究について概観した。次に、本研究の目的と本論文の構成について説明した。

第2章「小口径円管内強制流動沸騰実験」では、本研究の基礎となる、小口径円管内大

気圧水の強制流動時の圧力損失特性、熱伝達特性および限界熱流束に関する実験や観察を行い、得られた結果を整理した。実験結果は、まず、流れが安定している場合の圧力損失に関して均質流モデル等の予測手法と実験結果を比較し、それぞれのモデルの適用性を評価した。次に、壁面熱伝達率や限界熱流束に及ぼす主要パラメータの影響を調べた。また、可視化観察実験の結果の一例を示した。次に、流れが不安定となった場合での熱水力特性と限界熱流束特性を調べ、不安定流動発生領域と限界熱流束低下との関係を調べた。

これらの実験から、小口径円管内強制流動時の壁面熱伝達率や限界熱流束に及ぼす主要パラメータの影響が明らかになった。また、不安定流動実験の結果から、圧力降下振動、密度波振動、そして壁面温度振動発生時の圧力や壁面温度変動の特徴がわかり、圧力降下振動発生領域と不安定流動時の限界熱流束特性との関係が明らかになった。

第3章「小口径円管内強制流動熱伝達」では、安定流動時の壁面熱伝達実験の実験結果を基に、小口径円管内の壁面熱伝達率に関する最適相関式を示した。まず、液単相強制対流領域で既存の壁面熱伝達率相関式の適用の可能性を評価し、それにより得られた発達した領域用の式をもとに、加熱部入口からの距離を考慮した熱伝達率相関式を提案した。次に、核沸騰開始条件式を評価し、小口径円管用核沸騰開始条件式を示した。また、核沸騰領域の実験結果と既存の壁面熱伝達率相関式を比較し、飽和核沸騰領域での熱伝達率概算式を提示した。また、小口径円管内沸騰流の実験において、沸騰曲線上の遷移沸騰領域で正の勾配をもつ温度変化や長い時間振動幅となる壁面温度変動を示すことがあった。本章では、このような壁面温度変動の一例を示し考察した。

第4章「小口径円管内強制流動沸騰バーンアウト」では、バーンアウト発生機構をバーンアウト直前での加熱部壁面温度の変動特性と可視化観察結果をもとに分類し、バーンアウトのタイプ別にバーンアウトの発生機構について考察した。また、既存の限界熱流束相関式や機構論的モデル、または三流体モデルによる数値解析コードと実験結果とを比較し、本研究範囲への適用の可能性を評価した。特に、機構論的モデルや数値解析コードは限界熱流束値の予測評価とあわせて、バーンアウト直前での蒸気流速等関連物理量に関しても検討を行い、適用上の問題点を示した。

第5章「不安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰」では、不安定流動が発生した時の熱水力挙動を、二流体モデルを基礎とした解析モデルでシミュレーションし、本解析モデルと実験結果を比較した。比較結果から、本解析モデルにより不安定流動時の密度波振動を伴う圧力降下振動等熱水力特性が実験結果と近い特性となること、そして不安定流動発生領域が予測できることがわかった。

第6章「結言」では、本研究で得られた結果を総括した。

第2章 小口径円管内強制流動沸騰実験

§ 2. 1. 緒言

円管内強制流動沸騰伝熱に関する研究は、熱交換器や原子炉の熱設計や安全評価と関連し、昔から多くの実験や解析がなされている。しかし、これらの伝熱研究の多くが、通常口径円管を対象とし、加熱部長さも1 m以上の長い円管を対象としていた。

三島ら(Mishima ; 1996)による断熱二相流研究からも分かるように、小口径円管内での二相流特性は、通常口径管の流動特性と異なっている。しかし、管内径が6 mm以下の小口径円管内での沸騰流動に関する研究は、近年始められたものがほとんどであり圧力損失特性、熱伝達率特性、限界熱流束特性といった熱水力特性に関して十分な実験データが得られておらず、体系的な理解がなされているとは言えない。そして、通常口径円管を対象に提案された実験相関式やモデル式、そして数値解析コードの小口径円管への適用は、その適用範囲から外れるため予測精度が低下することが考えられる。

また、低圧下の小口径円管内で沸騰が生じた場合には、気液密度差が大きく加熱部内体積が小さいため、流れの不安定性が限界熱流束を大きく低下させる可能性がある。しかし、低圧下の小口径円管内で不安定流動が発生した場合の熱水力挙動、および限界熱流束特性に関する報告は少なく(Lowdermilk ; 1958)(Daleas ; 1965)(Maulbetsch ; 1966)、解析的な予測手法を確立するためにも、不安定流動発生領域および不安定流動時の熱水力データ、そして限界熱流束データを系統的に蓄積する必要がある。

本章では、低圧下での小口径円管内強制流動時の圧力損失、壁面熱伝達率、限界熱流束、および不安定流動時の熱水力挙動、限界熱流束を系統的に測定することにより諸特性を実験的に検討するとともに、諸特性を物理的観点から考察するうえで必要不可欠なデータベースを構築することを目的とした。

実験は、安定流動時の熱水力特性測定実験と、不安定流動時の熱水力特性測定実験の二通りに分けられる。安定流動時の熱水力特性測定実験には、(1) 圧力損失測定実験、(2) 熱伝達率測定実験、(3) 限界熱流束測定実験、及び(4) 可視化観察実験が含まれる。また、不安定流動時の熱水力特性測定実験としては、(1) 熱流束上昇時の壁温変動、圧力変動および限界熱流束測定実験、(2) 流量低下時の壁温変動、圧力変動および限界熱流束測定実験、及び(3) 不安定流動発生領域を調べる実験を行った。

§ 2. 2. 安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰

2. 2. 1. 実験装置

本実験で用いた実験ループの概略図を図2. 1に示す。作動流体には、イオン交換水を用いた。これが循環ポンプ、流量計、予熱器（もしくは冷却用熱交換器）、試験部へと循環する。イオン交換水は、試験部内を垂直上昇し、気水分離された後凝縮器へと循環する。流量は試験部入口に取り付けてある流量調節弁により調節した。システムの系圧力は、ポンプから流量調節用バルブまでが1. 3 MPaであり、試験部出口が大気圧開放されている。試験部入口水温は、容量の異なる数種類の予熱器と冷却用熱交換器を用いて所定の値に調節した。流量は、タービン式流量計もしくは浮き子式流量計を適切に組みあわせて計測した。電圧や温度等の計測値は、全てレコーダやデータロガーを介して計算機に転送した。そして、計算機内のプログラムにより諸物理量に変換し、表示とともにハードディスクに記録した。

本実験では、実験の条件別に2通りの試験部を用いた。それぞれの試験部と試験部支持台の概略図を、図2. 2（以後、Aタイプ試験部と呼ぶことにする。）、図2. 3（以後、Bタイプ試験部と呼ぶことにする。）に示す。Aタイプ試験部は、軸方向の壁面温度の測定ができるように軸方向に等間隔に3本以上の熱電対が銀ロウ付けしてある。そして、加熱部と銅電極の間に、銅箔をはさみ接触抵抗の低減を図っている。そして、試験部から外部への熱のもれを低減するために、加熱部外壁面にはグラスウールによる断熱を施した。加熱部から外部への熱のもれを見積もると、作動流体への伝熱量と比較し1 %以下となり、無視できることを確認してある。Bタイプ試験部は、バーンアウト実験を効率良く行えるように加熱部外壁面に熱電対を圧着してある。圧着とは、機械的に加熱部に非接地型熱電対を押し付けることを意味する。高熱流束時にスポット的に発生するバーンアウトをより近い位置で検出するために、加熱部出口には6本の熱電対を加熱部に機械的に押し付けてある。また、試験部が100 mm以上と長い試験部の場合、実験中に軸方向温度分布を確認するために上流側におおよそ等間隔に熱電対を付けた。これらの熱電対はテスト部の交換を効率よく進めるために銀ロウ付けはせず断熱用リボン型グラスウールと加熱部の間に挟み込む形で固定した。なお、加熱部外壁面上に付けてある熱電対には、シース外径0. 5 mmのクロメル・アルメル熱電対を用いた。加熱部材質はニッケルもしくはステンレスであり、実験条件を満たすように適切に選択した。横谷ら(1996)は、加熱表面の粗さと上流バーンアウトの関係を調べ、表面粗さが大きい場合に上流バーンアウトが発生すること

を報告している。本実験では、表面粗さがバーンアウトに及ぼす影響を無視できるように加熱部用円管には引き抜き管を用いた。引き抜き管は溶接管と違い溶接線がないため内表面の粗さは均質であり、本実験で用いた引き抜き管は特に表面粗さが数 μm と小さい高品質の管を用いた。管内径および肉厚の精度は $\pm 10\%$ 以下である。また、加熱により加熱部は熱膨張する。この熱膨張による管の屈曲を防ぐため、下部電極は支持台と固定せず、銅ケーブルの自重により管を垂直下方に引っ張ってある。

加熱部の加熱には、直流安定化電源（最高出力電流値 5000A 、最高出力電圧値 20V ）を用いて直接通電加熱した。実験は、基本的には試験部入口水温と質量速度を所定の値に設定した後、バーンアウト検出器が作動し電源が遮断されるか加熱部が焼け切れるまで加熱部への熱負荷を小刻みにステップ状に上昇させ、データを測定・記録した。

バーンアウトの発生は、試験部外壁面温度を測定している熱電対の指示値が急上昇を始めること（温度測定型バーンアウト検出器による検出）、または、加熱部の電気抵抗値の急激な上昇（抵抗測定型バーンアウト検出器による）のどちらか一方が生じることから確認した。温度測定型バーンアウト検出器の設定値は、高クオリティ領域でのバーンアウトの場合には 200°C 、サブクール沸騰領域でのバーンアウトの場合には、 $350\sim 400^\circ\text{C}$ の範囲で、最適と思われる値を経験的に設定した。また、 $50\text{MW}/\text{m}^2$ を超える高熱流束バーンアウト時には、現象がバーンアウト検出器の検出速度（約 0.1 秒）以上に早く進行するため、物理的バーンアウトに至った。この時の限界熱流束値とバーンアウト検出器が作動したときの限界熱流束値を比較した結果、バーンアウト検出器の設定値は適切に設定されており、バーンアウト検出器の有無が限界熱流束値に影響を与えないことを確認している。

限界熱流束値は、壁温が急上昇を始める直前、加熱部の電気抵抗値が急上昇する直前、または試験部が焼けきれる直前の計測値を用いて算出した。

本実験では、試験部出口の水温を常時計測していたが、最高でも 101°C であった。この結果から、出口圧力はほぼ大気圧とみなせる。

なお、測定に関する精度は、印加電力が $\pm 2\%$ 、質量速度が $\pm 3\%$ 、出口圧力が $\pm 2\%$ 、壁面温度、入口水温が $\pm 2\%$ 、そして限界熱流束の算出の誤差は、 L/D によって変わるが $\pm 2\sim 10\%$ と見積もられる。

2. 2. 2. 実験条件

(1) 圧力損失の測定

本研究ではまず、通常口径円管に比較的近い条件（管内径 D が 6mm で加熱部長さ L が 680mm 、垂直上昇流）で実験を実施した（以後、（A）試験と呼ぶ）。次に小口径短加熱部円管内（管内径 D が 2mm 、加熱部長さ L が 100mm 、水平）での圧力損失を測定し、既存の式やモデルによる計算値と比較し、検討を行った（以後、（B）試験と呼ぶ）。試験部入口水温 T_{in} は 30°C で、質量速度 G の範囲は、 $50\sim 4000\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ で実験を行った。（A）試験では、圧力損失と質量速度 G 、および熱流束 q との関係を調べるために熱流束を設定し、質量速度を段階的に低下させ、加熱部出入口間差圧 ΔP を計測した。（B）試験では、位置損失を0とするために試験部を水平に固定した。そして、圧力損失と熱流束の関係を調べるため、質量速度を一定値に設定し熱流束を段階的に増加させ、加熱部出入口間差圧を計測した。

なお、本実験では差圧測定用のタップを図2. 4に示す位置に設置している。この場合測定値は加熱部出入口間差圧と非加熱部の差圧の和を計測していることになる。上流側非加熱部の長さは加熱部長さと比べて短く単相流であるため、加熱部内が沸騰二相流となった場合は上流側の非加熱部の差圧が全計測差圧の数%以下と小さく無視できる。下流側に関しては、沸騰二相流時に数%高く加熱部出入口間差圧を見積もる可能性がある。従って、実験結果は実際の加熱部出入口間差圧より、沸騰二相流時に差圧を数%程度高く示している。

(2) 熱伝達率の測定

表2. 1に熱伝達率測定実験の実験条件を示す。用いた試験部は、Aタイプの試験部（熱電対が加熱部に銀ロウ付けされている。）を用いた。

(3) 限界熱流束の測定

表2. 2に限界熱流束実験の実験条件を示す。また、本限界熱流束実験で得られた全データを整理し付録に示す。試験部の管内径は、 $1\sim 6\text{mm}$ 、加熱部長さは $4\sim 680\text{mm}$ 、 L/D は $1\sim 113$ である。試験部への入口水温は、基本的には 10°C で行い、入口サブクール度の影響を調べる実験の場合には、 $10\sim 100^\circ\text{C}$ の範囲で実験を行った。質量速度は、 $0\sim 19130\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ で、流速にすると $0\sim 19.1\text{m}/\text{s}$ の範囲で実験を行った。壁面温度の上昇をバーンアウト検出器が検出し、物理的バーンアウトに至らなかった。

た場合には、同一試験部で実験を継続した。そして、物理的バーンアウトに至った場合には、同一寸法の試験部を再設定し、実験データを蓄積した。実験前と実験後に試験部の寸法等の検査を行い異常の有無を確認し、異常が発見されたデータはデータベースから削除した。また、不安定流動が原因で限界熱流束低下を起こしていたデータや、実験中に何らかの異常が生じたと思われるデータに関してもデータベースから削除した。

2. 2. 3. 測定値から諸物理量の計算

(1) 熱流束と限界熱流束

熱流束は、加熱部を流れる電流値と加熱部に取り付けた銅電極間電圧の積から、加熱部の管内面積を除いて求めた。限界熱流束値（CHF）の算出の際に特に本実験で注意した点は、バーンアウト発生直前に自発的に電圧が上昇する場合の限界熱流束の見積もりである。この場合、自発的電圧上昇後の電圧値（最高で5%程度高めに計算される）は、バーンアウトに起因する壁面温度の急上昇が原因であるため、本研究では電圧値は自発的電圧上昇前の電圧値を計算に用いた。

なお、物理的バーンアウトに達する熱流束をCHFとし、CHFより少し低い熱流束で壁温が振動する場合には、壁温振動開始熱流束からCHFの間の区間を沸騰遷移(Boiling Transition: BT)と呼ぶことにする。

(2) 試験部内差圧とサージタンク内圧力

試験部内差圧は、ひずみゲージ式差圧計を用いて計測した。不安定流動時のサージタンク内圧力の測定には、半導体型圧力計を用いた。この圧力計の取り付け位置は、ループ内平均水位と同程度で初期圧力が大気圧となる位置に取り付けた。

(3) 管内壁面温度

管内壁面温度 $T_{w, inside}$ は、管外壁面温度の実測値 $T_{w, outside}$ と熱流束 q から管外壁面が断熱されているとして加熱部壁面内で熱伝導方程式を解いて求めた。計算式を次に示す。

$$T_{w, inside} = T_{w, outside} - \frac{q \cdot r_i \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2 - 2 \cdot \ln \frac{r_i}{r_o} - 1}{1 - \left(\frac{r_i}{r_o} \right)^2} \quad (2 \cdot 1)$$

ただし、 k はニッケルもしくはステンレスの熱伝導率、 r_i 、 r_o はそれぞれ管の内半径と外半径を表している。

(4) 熱伝達率

検査位置での熱伝達率 h は、定義に従い以下の式で求めた。

$$h = \frac{q}{T_{w, inside} - T_f} \quad (2 \cdot 2)$$

ただし、 T_f は、熱バランスの式から求まる検査位置でのバルク水温である。なお、 $T_f \geq T_{sat}$ の場合は、 $T_f = T_{sat}$ とした。

(5) ヌセルト数

検査位置でのヌセルト数 Nu は、次式で定義される。

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k_f} \quad (2 \cdot 3)$$

2. 2. 4. 実験結果

(1) 圧力損失特性

図2. 5に管内径 D が2 mm、加熱部長さ L が100 mmの試験部を水平に設置し、入口水温 T_{in} が25℃での圧力損失特性を測定した結果を示す。また図中には、既存の圧力損失相関式を組み込んだモデルの予測結果と赤川の予測法(1969)による予測結果もあわせて示した。

一般に加熱部内の全圧力損失 ΔP は、次式によって表される。

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_h \quad (2 \cdot 4)$$

ここで、 ΔP_f は摩擦損失を、 ΔP_a は加速損失を、 ΔP_h は位置損失を表す。本実験では実験中加熱部内の差圧は変動していたので、図中、測定した差圧の最大値を●、最小値を▲でそれぞれ表している。

また、本論文では、エンタルピーでクオリティを計算することとし、加熱部出口での熱力学的平衡クオリティ $X_{e,x}$ (以後、出口クオリティと呼ぶ) は、エンタルピーバランスから次式で計算した。(2・5式は、円管における負のクオリティの定義にもなっている。)

$$X_{ex} = 4 \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{q}{G \cdot h_{fg}} \right) - \left(\frac{h_{sat} - h_{in}}{h_{fg}} \right) \quad (2 \cdot 5)$$

現在までになされている圧力損失研究の範囲内では、摩擦損失の全圧力損失に占める割合が高く、加速損失や位置損失の寄与分は小さく無視できる場合がほとんどであった。しかし、小口径円管の場合流動条件にもよるが、加速損失は摩擦損失と同程度にまで増大することが推測される。そこで、幾種もの既存の式とモデルを組み合わせ、本実験結果との比較を試みた。以下に、比較に用いた式を示す。

サブクール領域の長さ L_{sub} は、熱バランスの式から次式のように表わされる。

$$L_{sub} = \frac{D}{4} \cdot \frac{G \cdot (h_{sat} - h_{in})}{q} \quad (2 \cdot 6)$$

サブクール領域の摩擦損失 $\Delta P_{f,sub}$ は、次式で計算できる。

$$\Delta P_{f,sub} = 2 \cdot f \cdot \frac{L_{sub} \cdot G^2}{D \cdot \rho_f} \quad (2 \cdot 7)$$

ただし、摩擦係数 f は、次式で求めた。

$$\text{層流} : f = 16 / \text{Re}$$

$$\text{乱流} : f = 0.079 / \text{Re}^{0.25}$$

$$(2 \cdot 8)$$

沸騰二相流領域の長さ L_{TP} は、 $L_{TP} = L - L_{sub}$ と求め、沸騰二相流領域の摩擦損失の計算には、Martinelli-Nelson の整理法(Martinelli ; 1948)を、加速損失の計算には、(1) 均質流モデル、および(2) 環状流モデルの2通りで計算した。

Martinelli-Nelson(1948)は、円管内沸騰流の摩擦損失をグラフで示している。これを植田(1960)が以下のように定式化しているので、この式を沸騰二相流領域の摩擦損失の計算に用いた。

$$\frac{\Delta P_f}{\Delta P_{L0}} = 1 + 1.20 \cdot X_{ex}^{\frac{3}{4} \left(1 + 0.01 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_g}} \right)} \cdot \left[\left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.8} - 1 \right] \quad (2 \cdot 9)$$

ここで、 ΔP_{L0} は飽和水単相流が流れた時の摩擦損失を示し、次式で求まる。

$$\Delta P_{L0} = 2 \cdot f \cdot \frac{L_{TP} \cdot G^2}{D \cdot \rho_f} \quad (2 \cdot 10)$$

ただし、摩擦係数 f は、式(2・8)による。

加速損失の見積もりを(1) 均質流モデルと(2) 環状流モデルの両方で計算した。

[1] 均質流モデルによる加速損失の計算

均質モデルでは、加速損失は $X_{e,x}$ の関数として次式で表される。

$$\Delta P_a = \frac{G^2}{\rho_f} \left[X_{ex} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right] \quad (2 \cdot 11)$$

[2] 環状流モデルによる加速損失の計算

一般に、加速損失は $X_{e,x}$ と加熱部出口でのボイド率 $\alpha_{e,x}$ の関数として、次式で表される。

$$\Delta P_a = \frac{G^2}{\rho_f} \left[\frac{X_{ex}^2}{\alpha_{ex}} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right) + \frac{(1 - X_{ex})^2}{1 - \alpha_{ex}} - 1 \right] \quad (2 \cdot 12)$$

環状流モデルでは、加熱部出口でのボイド率 $\alpha_{e,x}$ を適切に予測する必要がある。そこで、本研究では、加熱管内のボイド率相関式として Thom の式(1964)、Smith の式(1967)、Bankoff の式(1960)を検討した。その結果、Thom の式は均質流モデルに近い $\alpha_{e,x}$ 値を予測し、

Bankoff の式は、かなり低い値 ($\alpha_{e,x} < 0.7$) を予測することがわかった。そして Smith の式によれば両者の間に $\alpha_{e,x}$ 値が計算され、可視化観察結果と比較的近い値を予測していると考えられたので、Smith の式を加熱部出口のボイド率の算出に用いることにした。Smith は、二相流を液相と均質混合相からなる分離流と考え、両相の等速ヘッドが等しくなるとの仮定に基づいて、次式を提案している。

$$\alpha = \left\{ 1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot e \cdot \left(\frac{1}{X} - 1 \right) + \frac{\rho_g}{\rho_f} \cdot (e - 1) \cdot \left(\frac{1}{X} - 1 \right) \left[\frac{\rho_f / \rho_g + e \cdot (1/X - 1)}{1 + e \cdot (1/X - 1)} \right]^{1/2} \right\}^{-1} \quad (2 \cdot 13)$$

ここで、 e は全液流量に対する均質混合相中の液流量の比であり、Smith は実験結果に基づいて 0.4 を推奨している。そこで、ここでは推奨値をそのまま用いることにする。

赤川ら(1969)は、垂直に設置した沸騰管内圧力損失の計算法を提案している。そこで赤川の計算法と実験結果の比較もあわせて行ってみた。以下に赤川の予測法を示す。

ある一様な熱流束 q 、圧力、サブクールエンタルピ $\Delta h_{sub} = h_{sat} - h_{in}$ 下で、加熱部出口においてちょうど飽和液となる仮想的な質量速度を基準質量速度 G_0 とし、これを次式で与える。

$$G_0 = 4 \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{q}{\Delta h_{sub}} \quad (2 \cdot 14)$$

そして、この時の圧力損失を基準圧力損失 ΔP_{f0} とし、次式で与える。

$$\Delta P_{f0} = 2 \cdot f \cdot \frac{L \cdot G_0^2}{D \cdot \rho_f} \quad (2 \cdot 15)$$

ここで、サブクール領域の液の密度は飽和液のそれに等しいと仮定する。二相流領域は均質流モデルによる平均密度 ρ_H を用いて記述する。

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{1}{\rho_f} \left[1 + X \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right] \quad (2 \cdot 16)$$

このとき、全圧力損失（サブクール領域と沸騰二相流領域からなる場合）は、

$$\Delta P_f = \int_0^{L_{sub}} 2 \cdot f \cdot \frac{G^2}{D \cdot \rho_f} dz + \int_{L_{sub}}^L 2 \cdot f \cdot \frac{G^2}{D \cdot \rho_f} \left[1 + X \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right] dz \quad (2 \cdot 17)$$

ここで、 L_{sub} はサブクール領域の長さで、次式で求まる。

$$L_{sub} = \frac{D}{4} \cdot \frac{G \cdot \Delta h_{sub}}{q} \quad (2 \cdot 18)$$

摩擦係数 f は、 G_0 における値と等しいと仮定し、この積分を実行して、上記の基準値 ΔP_{f0} 、 G_0 で正規化すると次式となる。

$$\Delta P_{f*} = \frac{1}{2} \cdot N_{sub} \cdot \xi^3 + (1 - N_{sub}) \cdot \xi^2 + \frac{1}{2} \cdot N_{sub} \cdot \xi \quad (2 \cdot 19)$$

ただし、 $1 > \xi \geq \frac{1}{1 + h_{fg} \cdot \Delta h_{sub}}$ 、

また、

$$\xi = \frac{G}{G_0}, \quad \Delta P_{f*} = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_{f0}} \quad (2 \cdot 20)$$

であり、それぞれ、無次元流量、無次元圧力損失と呼ばれている。また、 N_{sub} はサブクーリング数で、次式で定義されている。

$$N_{sub} = \frac{\rho_f - \rho_g}{\rho_g} \cdot \frac{\Delta h_{sub}}{h_{fg}} \quad (2 \cdot 21)$$

実験結果と各予測法の比較結果

図 2.5 では、細い実線が、 ΔP_f の計算を Martinelli-Nelson の式(MN)で計算し、 ΔP_a の計算を均質流モデル(HM)で計算した結果を、太い実線は、 ΔP_a の計算を環状流モデル(SM)でボイド率を Smith の式で計算した結果を、点線は、赤川の計算法による

予測値をそれぞれ示している。また、実験中加熱部内の差圧は変動していたので、図中、測定した差圧の最大値を●、最小値を▲でそれぞれ表している。

この図2. 5から、 ΔP_f を Martinelli-Nelson の式で計算し、 ΔP_g を環状流モデルを基礎としそのボイド率を Smith の式で計算した結果が実験値に最も近い値なることがわかった。そして、均質流モデルによる結果や赤川の方法も差圧の最大振動値に比較的近い値に計算されることがわかった。なお、 ΔP の値が Point (1) で、大きくなる原因として、変動幅が大きいことからスラグ流の軸方向に占める割合が大きくなったことが考えられる。そして、Point (2) で低下している原因として、環状流の占める割合が高くなり、差圧が一時的に低くなったと考えられる。また、Point (3) 以降は、変動幅が小さくなることから気泡流やスラグ流の管内に占める割合が小さくなり、安定した環状流が形成されていると考えられる。

小口径円管では、このように圧力損失の増減が激しいが、この増減をより適切に予測するためには、摩擦損失のみならず、加速損失や位置損失も適切に予測する必要がある。そのためには、小口径円管内の流動様式の判別式、そしてボイド率分布に関する適切な式が必要である。しかし、現在小口径円管内沸騰流の流動様式やボイド率分布は明らかにされておらず、特にボイド率に関する研究が今後なされる必要がある。

(2)熱伝達特性

図2. 6に管内径 D が2 mm、加熱部長さ L が3 6 0 mmの円管内に質量速度 G が1 0 0 0 k g / m² s、入口水温 T_{in} が2 0 ℃でイオン交換水を流した時の熱流束上昇にともなう軸方向の外壁面温度の変化を示す。管内径が2 mmの場合、質量速度が1 0 0 0 k g / m² s以下で核沸騰が生じ始めると図2. 6の中央部に見られるように壁温の振動が顕著に現れる特徴がある。そして一端核沸騰が生じた後は壁温は熱流束の上昇とともに安定して上昇している。

本章では、内壁面での壁面熱伝達率（以後、熱伝達率と呼ぶ。）を検討するため、式2. 1により外壁面温度から内壁面温度（以下、壁温と呼ぶ。）を計算し、加熱部入口からの距離や管内径、および質量速度の熱伝達率に及ぼす影響を調べた。以下に実験結果を示す。

図2. 7に管内径 D が2 mm、加熱部長さ L が3 6 0 mmの円管内に質量速度 G が1 0 0 0 k g / m² s、入口水温 T_{in} が2 0 ℃でイオン交換水を流した時の壁温と熱流束の関係を示す。ここで横軸 $T_{w, inside}$ は、式(2. 1)より求まる加熱管の内壁面温度を表してい

る。図2. 7では0. 1 5 MW / m²以下でおおよそ点線より低い壁温側が液単相領域と考えられる。そして、図2. 7中の0. 4 MW / m²以上で核沸騰が生じていると考えられ、点線より高い壁温側は核沸騰領域と考えられる。図2. 7から液単相強制対流領域では、同じ熱流束条件下で入口側の測定値が他の測定値より低い壁温を示していることがわかる。この結果から入口では熱伝達率が高くなり、加熱部入口からの距離 z と加熱部長さ L の比 z / L が約0. 8以上では熱伝達率の軸方向への依存性が小さくなっていることがわかった。しかし、入口での熱伝達率向上効果も核沸騰領域では無視できる程度に小さくなり、核沸騰領域では壁温、熱伝達率共に平坦化することがわかった。図2. 8に D が6 mm、 L が3 6 0 mmの円管内に G が1 0 0 0 k g / m² s、 T_{in} が2 0 ℃でイオン交換水を流した時の壁温と熱流束の関係を同様に示す。図2. 7と同様に z / L が約0. 8以上では熱伝達率の軸方向への依存性が小さい。その他の実験条件でも液単相領域では z / L により壁温の差が大きくなり、核沸騰領域では z / L の影響が顕著ではなかった。

図2. 9および図2. 1 0は、図2. 7および図2. 8の実験条件で得られた結果から熱伝達率 h を計算し、 z をパラメータとし壁温の関数として示した結果を示す。図2. 9および図2. 1 0から以下のことがわかる。

- (1) 壁温が低く液単相領域と考えられる領域では、 h は壁温にあまり依存せずほぼ一定値と見なせる。また、 z が小さいほど h が高い値となる。
- (2) 壁温が水の大気圧飽和温度である1 0 0 ℃以上で安定した核沸騰が生じていると考えられる領域では、液単相領域とは反対に z が大きいほど h が高い値となる。
- (3) 管内径が小さい場合、図2. 9の中で見られるように沸騰開始時に高熱伝達率になる。この傾向は、 G が低いほど顕著である。

図2. 1 1は図2. 7の実験条件でヌセルト数 Nu を計算し、次式で計算される局所クオリティ X の関数として表示した結果を示す。

$$X = 4 \cdot \left(\frac{z}{D} \right) \cdot \left(\frac{q}{G \cdot h_{fg}} \right) - \left(\frac{h_{sat} - h_{in}}{h_{fg}} \right) \quad (2. 22)$$

図2. 1 1から $X < 0$ では Nu が急勾配で上昇することがわかる。 $X = 0$ を境に特性は変化し $X > 0$ の領域では、 $X = 0$ 近傍の低クオリティ条件で気泡流・スラグ流による二相流攪拌効果が原因と考えられる熱伝達率向上が一時的に観察される。それ以上のクオリティでは一端熱伝達率が低下した後、熱伝達率は低勾配で単調増加する。この高クオリティ条件での単調増加は環状液膜が強制対流蒸発により薄くなり、かつ蒸気流速が増すことが

原因であると考えられる 図2. 12は同様に図2. 8の実験条件で Nu を計算し、 X の関数として表示した結果を示す。図2. 12の傾向は図2. 11の傾向と同様である。他の実験条件でも Nu - X グラフ上の傾向は G に依存せず同様であった。なお、図2. 12中の右下がりになっている部分は沸騰遷移による壁温振動が発生していることを示している

(2. 1) 管内径が熱伝達特性に及ぼす影響

管内径および質量速度が、熱伝達率に及ぼす影響を調べた結果を図2. 13示す。図2. 13では、 D および G をパラメータとして Nu を X の関数として表示した結果を示している。なお、これらの値は出口端での測定値を用いて計算している。図2. 13から D 以外が同じ条件である場合、傾向は同じであるが D が小さくなるほど Nu （熱伝達率）が小さくなることがわかる。これは管内径が小さい場合、液単相領域では流れの層流化が起こり、核沸騰領域では気泡の二相乱流混合が抑制されることが原因であると考えられる。

(2. 2) 質量速度が熱伝達特性に及ぼす影響

図2. 13から、質量速度が熱伝達率に及ぼす影響は $X < 0$ で顕著であるが、 $X > 0$ では比較的小さいことがわかる。

(2. 3) 加熱部入口からの距離が熱伝達特性に及ぼす影響

図2. 14に D が2 mm、 L が360 mmの円管内に G が1000 kg/m²s、 T_{in} が20℃でイオン交換水を流した時の Nu を Z の関数とし、熱流束 q をパラメータとして示した。図2. 7および図2. 14から液単相強制対流領域では、入口の熱的に未発達な領域で熱伝達率が高く、壁温が低くなることが確認できる。熱的に発達するまでの距離は、入口形状や実験条件により異なるが、 z/D が50以下で熱伝達率の変化率が大きいことから、以後 $z/D < 50$ の領域を熱的助走域と呼ぶことにする。そして熱流束がより増加すると下流端から沸騰が始まり急激に熱伝達率が上昇を始めている。そして熱流束の上昇とともに核沸騰領域は上流に広がり、下流になるほど熱伝達率が上昇している。

(3) 限界熱流束特性

安定流動時の限界熱流束実験を行い、主要なシステムパラメータの限界熱流束に及ぼす影響を調べた。限界熱流束実験を進める過程で多くの知見を得たので、まずは主要パラメ

ータ以外のパラメータが限界熱流束に及ぼす影響について以下に記す

(1) 加熱部入口の圧縮性空間の影響

実験開始時、加熱部入口側にブルドン管型圧力計を接続していた 幾らかの実験結果から、本実験の様に加熱部が小さい場合、入口でのエネルギー吸収体（ブルドン管型圧力計等圧縮性空間）の存在により、限界熱流束が出口クオリティが0となる熱流束近傍まで低下することがわかった。そこで、不安定流動時の限界熱流束特性は別項目で正確に実験することとし、安定流動実験では、以後ブルドン管型圧力計は接続せず、入口側の圧縮性空間は完全に排除した。

(2) 加熱部入口側の弁の絞りの影響

絞り弁上流側圧力が限界熱流束に及ぼす影響を測定した結果、流量調節弁までの系圧力が0. 8 MPa以下で限界熱流束が低下する場合があった。そのため、本実験では絞り弁上流側圧力を1. 3 MPaに設定した。

(3) ヒーター肉圧の影響

肉厚が薄い（0. 25 mm）円管を加熱部に用いると物理的バーンアウトに至りやすく、限界熱流束値がばらつく傾向があった。AERE Harwell やAEE Winfrith(Lee ; 1965)には、高圧下で肉厚が2. 1 mmから0. 86 mmに減少したとき5%以下の限界熱流束低下があると報告されており、また、Tippets(1962)によると高圧下で肉厚が0. 25 mmから0. 15 mmに減少したとき20%近く限界熱流束が低下したと報告されている。これらの報告から管内径が4 mmのニッケル管の結果に関してはこの薄い壁面の効果が5～20%程度含まれている可能性がある。

(4) 電極からの熱の損失

加熱部が小さく、壁面温度が高い場合、軸方向の熱のもれが考えられた。そこで、銅電極表面温度と壁面温度をそれぞれ測定し、熱のもれを調べた。本実験で熱のもれが重要になると考えられる小加熱部試験部の場合、電流値が高いため銅電極の温度も100℃を超えるまで高くなる場合もあり、加熱部から銅電極への熱勾配は小さく、軸方向のもれは5%以下であった。

(5) 加熱部材質の影響

本実験では、加熱部材質としてニッケルおよびSUS316を用いて同一条件の実験を幾らか行った。そして、加熱部にニッケルを用いた場合とSUS316を用いた場合での実験結果を比較し、加熱部材質の違いが限界熱流束に及ぼす影響を調べた。その結果、両者の実験結果はお互いの実験誤差の範囲内で一致した。この結果から、加熱部材質の限界熱流束に及ぼす影響は、本実験範囲内では無いものと考えられる。

(3. 1) 管内径が限界熱流束に及ぼす影響

図2. 15は、加熱部長さ L が100 mm、入口水温が10℃の場合の実験結果であり、管内径をパラメータとして質量速度による限界熱流束の変化を示す。加熱部長さを一定とした場合には、管内径が小さい程加熱部出口の熱平衡クオリティ $X_{eq} = 1$ となる線が高流

量側に移行するため同じ出口クオリティでバーンアウトしたデータも管内径が小さいほど高流量側に移行することになる。そのため、同じ質量速度での限界熱流束を比較した場合、高クオリティ域でバーンアウトする領域では、管内径が大きいほど限界熱流束が高いという結果になる。しかし、加熱部長さを一定として整理する方法は、沸騰現象と熱流束・質量速度・管内径の関係が明確でなく、バーンアウト現象別の領域分けを行い、バーンアウト発生機構を考察するには不向きである。そこで、加熱部長さ L と管内径 D の比 L/D を用いて以後データ整理を行うことにする。 L/D で整理する長所は、 $X_{e,x}$ が $q-G$ グラフ上で 管内径によらず決定され、バーンアウト発生機構の考察が行いやすいことである。

図 2. 16 は、 L/D が 5、入口水温が 10°C の場合の実験結果であり、管内径をパラメータとして質量速度による限界熱流束の変化を示す。図 2. 16 中の点線は、 $X_{e,x} = 0$ および 1 となる線を示している。図 2. 16 から、管内径が 1 mm の全データが 6 MW/m^2 から最高 15.8 MW/m^2 まで、質量速度の増加とともに限界熱流束が非常に高い値に変化している様子が分かる。なお、 $X_{e,x} = 0$ 近傍の斜線部については後で議論することにする。

Gambill ら(1989)は、蒸発面上での気体分子の移動速度により沸騰の上限熱流束 $q_{\max, \max}$ が決まると仮定して、気体分子運動論に基づき次式を導出している。

$$q_{\max, \max} = \rho_g \cdot h_{fg} \cdot \sqrt{RT/2\pi} \quad (2.23)$$

大気圧下の水の場合には、上式により計算される上限熱流束は 22.4 MW/m^2 となる。本研究で得られた最高値は式 (2.23) との限界熱流束比が 0.7 となり、従来報告されている大気圧下でのデータ中では最も Gambill らの理論的限界値に近い値に属する。管内径が 2、4、6 mm のデータに関しては、 $X_{e,x} = 0 \sim 1$ の領域で、質量速度が限界熱流束に与える影響は比較的小さく、限界熱流束は管内径に大きく依存し、管内径が小さいほど限界熱流束が高い値となることが確認された。図 2. 17 は、 L/D が 25 での限界熱流束の変化を同様に示している。 L/D が大きくなることにより、高クオリティで限界熱流束が管内径にほとんど依存しない領域が現れてくることが分かる。この領域では、限界熱流束時の $X_{e,x}$ の特性が $X_{e,x} = 1$ の線に沿って変化する。以後、この領域の流量を低流量と呼び、そしてこの低流量区間より低流量側で $X_{e,x} > 1$ となる流量を微小流量、低流量区間より高流量側で低い $X_{e,x}$ 値で限界熱流束に至るような流量を高流量と呼ぶことにする。なお、 L/D が 10 の結果は、図 2. 16 と図 2. 17 の中間的な分布となっており、 L/D が 50 の結果は、図 2. 17 の高クオリティでの管内径に依存しない領域が広がっ

たような分布となっていた。以上の結果から管内径の限界熱流束へ与える影響をまとめたものを以下に示す。

- (1) $X_{e,x} < 0$ の領域では、管内径と L/D がともに極端に小さい場合を除くと、管内径が小さいほど限界熱流束が高い値となる。
- (2) 高クオリティ領域では管内径の影響は比較的小さい。
- (3) これらの中間領域では管内径の影響は顕著であり、管内径が小さいほど系統的に限界熱流束が高い値となり、 L/D が小さいほど管内径の影響が顕著である。

(3.2) L/D が限界熱流束に及ぼす影響

図 2. 18 は、管内径が 1 mm、入口水温が 10°C の場合の実験結果であり、 L/D をパラメータとして質量速度による限界熱流束の変化を示す。図 2. 18 から L/D が 5 および 10 での実験結果の一部が $X_{e,x} = 0$ 近傍でばらついているのがわかる。細管内で、入口端では高サブクール状態、出口端では飽和状態となる場合、管内では、チャギングのように蒸気泡が伸縮を繰り返す流動となっていることが後述する可視化観察結果から分かっている。蒸気泡の発泡条件や蒸気泡の長さ、上昇速度、そして伸縮周期が微妙に変化することにより、限界熱流束が 15% 程度の誤差範囲でばらついたと考えられる。なお、このばらつく誤差は、管内径、 L/D および質量速度が大きくなるにつれて減少し、 $D > 4\text{ mm}$ 、 $L/D > 25$ 、 $G > 1500\text{ kg/m}^2\text{s}$ では、8% 以下になる。

図 2. 19 は、管内径が 4 mm、入口水温が 10°C での実験結果で質量速度と L/D が限界熱流束に及ぼす影響を示している。図 2. 19 から、 L/D の影響は特に高流量で顕著となり、 L/D が小さいほど限界熱流束が高くなる傾向があることがわかる。管内径が 1、2、6 mm での結果も、図 2. 19 と同様であり、高流量、低 L/D で急激に限界熱流束が増加する傾向を確認できた。

図 2. 20 は、図 2. 19 のデータを質量速度をパラメータとして L/D による限界熱流束の変化を示している。Vandervolt ら(1994)は、 $G > 5000\text{ kg/m}^2\text{s}$ のデータをもとに L/D の影響が顕著に現れるのは、 L/D が 10 以下であると報告している。本研究では、図 2. 20 に示すように、高流量であれば $L/D = 10 \sim 25$ を境に、 L/D が小さくなるほど限界熱流束が急上昇する低 L/D 領域と L/D の変化に対して限界熱流束の変化が顕著でない高 L/D 領域におおよそ分けることができる。そして、流量が小さくなれば、 $L/D = 50$ まで L/D の影響が顕著に現れ、 L/D が小さくなるほど限界熱流束は上昇の割合を増す。

(3. 3) 入口サブクール度が限界熱流束に及ぼす影響

図2. 2 1は、管内径が6 mm、 L/D が5の場合の実験結果であり、限界熱流束を入口サブクール度 ΔT_{in} の関数としてプロットした結果を示す。また、図2. 2 2に同実験結果を $X_{e,x}$ の関数としてプロットした結果を示す。 $L/D=5$ と加熱部長さが極端に短い場合は、図2. 2 1のように限界熱流束がばらつく領域がある。このばらつく領域と高流量を除くと入口水温の限界熱流束に及ぼす影響は小さいと言える。 $X_{e,x}$ の関数としてプロットした図2. 2 2から、 $X_{e,x} > 0$ の領域では、同質量速度では、同グラフ上で右上がりの傾向があることが、 $X_{e,x} < 0$ の領域では、左上がりの傾向があることがわかった。そして、限界熱流束は、Point (A) ($X_{e,x} = 0$ 近傍) で最小値をもっている。図2. 2 1上でのPoint (A)位置もあわせて記した。図2. 2 1と図2. 2 2より、わかったことを以下に記す

- (1) データがばらつく一部の領域を除いて、 $X_{e,x} > 0$ でバーンアウトする領域では、入口サブクール度の限界熱流束に及ぼす影響は小さい。
- (2) $X_{e,x} < 0$ でバーンアウトする領域では、入口サブクール度が大きくなるほど、限界熱流束は大きくなる。

Lowdermilk ら(1958)は、小口径円管で $L/D > 50$ の試験部を用い、 $X_{e,x} > 0$ の範囲で限界熱流束実験を行いデータを整理した結果、入口水温の限界熱流束に及ぼす影響は無視できる程度に小さいと報告している。上記(1)の結果は、定性的傾向が Lowdermilk の報告と一致している。しかし、(2)の結果から Lowdermilk の式を $X_{e,x} < 0$ の範囲まで外挿することに関しては、式中に入口サブクール度を考慮していないことから問題があると思われる。

(4) 可視化実験

小口径円管内や加熱部長さが短い円管内での沸騰流は、通常口径管や加熱部長さが長い加熱管内での沸騰流と流動様式が異なることが予想される。そこで、小口径円管や短加熱部円管内特有の現象を確認するために、二種類の可視化観察用の試験部を用い、流動様式の観察を行った。

(4. 1) 試験部と観察方法

小口径円管内での沸騰の観察には、管内径が2. 4 mmの石英ガラス管を、流れ方向に290 mmの区間を外周から加熱できるようにした試験部を用いた。この試験部を可視化

試験部Aと呼ぶことにする。図2. 2 3の左にこの可視化試験部Aの概略を示す。加熱には、銅ブロック中にガラス管の両側に平行に埋め込んだ2本のカートリッジヒータを用いた。この加熱部下流端には、長さ80 mmの可視化観察用の窓を設け、この窓を通して現象を高速度ビデオ(1000フレーム/秒)により記録し、スロー再生し観察した。また、図2. 2 4の左に加熱部長さが短い円管内での沸騰の観察に用いた半周加熱試験部の概略図を示す。この試験部を可視化試験部Bと呼ぶことにする。この試験部は、管内径が6 mmで肉厚が1 mmのステンレス管を加熱部長さ30 mmの長さ($L/D=5$)だけ縦に半分になり、この部分に管内径8. 8 mmのガラス管をかぶせ可視化試験部とした。なお、これらの可視化試験部では限界熱流束まで熱流束を上げ、物理的バーンアウトに至るまで録画を繰り返した。

(4. 2) 観察結果

Aタイプ可視化試験部を用いて管内径が2. 4 mm円管の出口近傍の沸騰の様子を観察した。観察の一例を図2. 2 3の中央に示す。なお、図中の白い実線は、高速度ビデオの撮影画像の輝度分布を画像処理装置で求め、重ねた結果である。本試験部内で発生した蒸気泡表面で、透過光は反射され、結果として蒸気泡位置の輝度は低下する。図2. 2 3の右図は、中央の結果を参考にして描いた観察例を表している。Aタイプ試験部を用いた流動の観察から以下に示すような、小口径円管特有の現象が発生していることがわかった。

- (1) $X_{e,x} < 0$ 、すなわちサブクール領域でも出口での蒸気泡の直径は、管内径程度まで大きくなることもある。この蒸気泡の上下端には半球状のメニスカスが形成され、上下気泡間での合体は発生しにくい。
- (2) $X_{e,x} = 0$ 近傍では、チャギングに似た流れの振動が発生し、長い液スラグと蒸気スラグとが数秒以上の周期で振動を繰り返す流れとなっている。
- (3) 管内壁面上では、小さなサブクール気泡が周期的に伸縮を繰り返しながら上昇し、合体気泡になると急速に出口方向に膨張していた。

Bタイプ可視化試験部を用いて、加熱部長さが短い小口径円管内での沸騰の様子を観察した。観察結果の一例を図2. 2 4の右に示す。(a)は微小流量[$G=4.8 \text{ kg/m}^2\text{s}$]のときのドライアウトの様子を、(b)は低流量[$G=28 \text{ kg/m}^2\text{s}$]の時のドライアウトの様子を示している。なお、(a)(b)共に $T_{in}=50^\circ\text{C}$ である。(a)から、微小流量時には加熱部上端から液膜が流下することにより加熱部中央にドライパッチが発生していることが、(b)からは、ドライパッチが加熱部上端付近で発生とリウエットを繰り返す

返した後、白熱領域が上流側まで広がり破断（b 7 は破断直後）してゆく様子が観察できる。高速度ビデオによるドライアウト現象の観察から以下のようなことがわかった。

- （１） 管中央を高速に上昇する液滴が、すぐに出口に到達し、加熱部内で液膜に再付着しにくい様子が観察された。この加熱部が短いときのデポジション率の低下は、限界熱流束を低下させる効果があると考えられる。
- （２） 一方、（b 1）から（b 3）のように、周期的に液塊が発生する様子も観察された。加熱部が短いときには、管入口で発生した蒸気泡がその上部のサブクール液塊を出口まで吹き飛ばし、加熱部上端に形成されたドライパッチをリウエットする

現象（１）と現象（２）は、液の上昇速度と大きさ、および（２）が周期的である点で異なり、バーンアウトに及ぼす影響は、現象（２）の限界熱流束上昇効果の方が優勢と考えられる。低流量で、加熱部上端の液膜がドライアウトすることによりバーンアウトに至る場合、液塊によるリウエット効果の大きい加熱部長さが短い管ほど限界熱流束が高くなるものと考えられる。高流量での観察結果は、入口水温の影響を受けるので後述する。

本研究で用いた可視化試験部 B は、半周加熱である。そこで、非加熱部が限界熱流束に及ぼす影響を考察するために、可視化試験部 B を用いて得られた限界熱流束値と全周加熱試験部での限界熱流束値とを比較した。また、高橋ら(1994)が陽子線を用いて管内の流動様式を観察した結果と、本研究での観察結果を比較した。比較結果を以下に示す。

- （１） 可視化試験部 B（半周加熱）を用いて測定された限界熱流束値は、他の条件を同じにし、質量速度の関数としてみたとき、全周加熱試験部による限界熱流束値と比較的近い値となった。小林(1997)による管内径が 6. 1 2 mm、 L/D がおよそ 6 0 の半周加熱試験部を用いた限界熱流束実験によると、高質量速度では半周加熱の影響は小さいが低質量速度の場合には半周加熱試験部の限界熱流束値が全周加熱試験部の限界熱流束値より低くなる傾向を示している。小林の報告と比較して、本可視化試験部による実験は L/D が小さいため、半周加熱の限界熱流束に及ぼす影響が顕著に現れなかったものと考えられる。
- （２） 高橋ら(1994)は、陽子線により細管内での沸騰気泡を可視化し、この観察結果を報告している。作動流体にはエチルアルコールを用い、管内径が 1. 3 8 mm と 1. 8 8 mm の 2 種類のステンレス管を 2 0 mm 加熱し、作動流体を自然循環させて、その内部の沸騰の様子を観察している。高橋らの全周加熱試験部を用いての観察結果と、本研究で半周加熱試験部を用いて、低流量時に観察された結果を比較すると、双方共に蒸気泡と液が交互に流れる流動様式となっている点が共通していた。高橋らの実験は自然対流、本実験は強制対流といった違いがあり、自然対流では流

れが不安定になりやすい等流動様式が広い流量範囲でまったく同じになることは考えにくい。また、エチルアルコールと水の物性を比較すると、エチルアルコールの方が密度、沸点、熱伝導率そして比熱のどれもが水より低い値であり、同じ大気圧下の実験でも沸騰時の流動様式は異なることが予想される。しかし、低流量時での小口径円管内の流動条件下で、比較的似た様相が観察されたことは興味深い。

（１）（２）より、小口径円管で加熱部長さが短く低流量である場合には、非加熱部の影響は、限界熱流束、流動様式共に小さいと考えられる。

§ 2. 3. 不安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰

2. 3. 1. 実験装置

図 2. 2 5 に不安定流動実験に用いた実験ループの概略図を示す。基本的には、図 2. 1 と同様であるが、試験部の上流に不安定流動を発生させるためのサージタンク（容積 5. 7 7 リットル、高さ 1 3 5 0 mm、内径 1 0 0 mm のアクリル製円筒）が接続されている。なお、サージタンクと試験部の間は、圧力損失を少なくするため 1 インチ管を用いた。サージタンク内の圧縮性空間は、コンプレッサーにより注入された空気である。初期体積は、サージタンクと主ループ間の弁とコンプレッサーの出口弁及びサージタンク上面に接続された弁を調節して所定の値に設定した。初期体積は、コンプレッサーの出口弁とサージタンクと主ループ間の弁を全閉し、サージタンク上面に接続された弁を大気開放した時の体積とした。以後、圧縮性空間の体積 V は、この初期体積を示すこととする。

なお、初期体積設定後は、サージタンク上面に接続された弁及びコンプレッサーの出口弁を全閉し、サージタンクと主ループ間の弁（圧力損失の小さい弁）を全開し、不安定流動実験を開始した。

2. 3. 2. 実験条件

試験部には、加熱部長さが 6 8 0 mm、管内径が 6 mm、肉厚が 2 mm のステンレス円管を用いた。加熱部外壁面温度の測定は、A タイプ試験部と同様に、ほぼ等間隔に 1 6 本の熱電対を銀ロウ付けしてある。この熱電対を用いて壁温振動の記録やバーンアウトの検出を安定流動時の実験と同様に行った。

各種実験に先立ち実験の条件を次のように設定した。試験部入口にある流量調節弁までの圧力を 1.3 MPa とし、弁より上流側の流動の乱れが下流側に伝わらないようにした。試験部内の流れは上昇流とし、試験部出口の圧力は常に大気圧近傍とした。また、試験部へ流入する水の入口温度は、 30°C に設定した。

不安定流動時のバーンアウトの判定は、温度測定型バーンアウト検出器の温度設定値を 350°C に設定し、急激な温度上昇により、この設定値を超えたときをバーンアウトと判定した。

加熱部内差圧は、図2.4(A)に示す位置で測定した。

実験は、安定流動時の圧力損失の測定から始めた。

圧力損失特性を調べるために、まず加熱熱流束を設定し、質量速度をステップ状に低下させて、それぞれの差圧を測定した。測定結果を、図2.26に示す。この実験結果から、熱流束が 0.8 MW/m^2 以上では、圧力損失が $\Delta P-G$ カーブ上で極小値を持つことがわかる。また、熱流束が高いほど、極小値は高流速、高圧力損失側に移行していることがわかる。なお、図2.20の測定点以下の質量速度では、差圧の振動が大きくデータの信頼性が低下するので記していない。図中の点線で示す線は、管内を液単相流が満たしたときの圧力損失を示しており、負の勾配部は沸騰二相流となっている領域である。

以後、流量が一定で熱流束が上昇する場合を、CASE 1と呼び、熱流束が一定で流量が低下する場合を、CASE 2と呼ぶことにする。

2.3.3. 流量が一定で熱流束が上昇する場合の変動特性

(1) 圧力と壁面温度の変動特性

CASE 1で実験を行い、得られた結果の一例を図2.27に示す。図中の ΔP は加熱部内差圧を、 $T_{w,x}$ は加熱部出口近傍の壁温をそれぞれ示す。一連のCASE 1の実験から、加熱部内差圧と加熱部出口近傍の壁温の振動の周期は、熱流束を増すことにより、 $0.2 \sim 70$ 秒へと長くなり、そして差圧の振動も増加することがわかった。

差圧と壁温の振動波形から、差圧が安定して低下するときに壁温が急激に低下し、それから1、2秒程度の周期の振動を起こしながら差圧が低下するときに、壁温が急激に上昇しバーンアウトに至ることがわかった。この 1 Hz 程度の流動変動は、加熱部長さが 680 mm の円管内で発生する密度波振動による周波数と近い値であるため密度波振動と考えられる。

(2) 限界熱流束特性

CASE 1で実験を行い、限界熱流束特性を調べた。その結果を図2.28に示す。CASE 1での限界熱流束結果は、非常に特徴のあるラインを示しており、圧縮性空間の体積が大きいほど(1) 限界熱流束がステップ状に大きく低下すること (2) ステップ状に大きく低下するときの質量速度の値が低い方へ移行すること。がわかった。

2.3.4. 熱流束が一定で流量が低下する場合の変動特性

(1) 圧力と壁面温度の変動特性

図2.29にCASE 2による、実験結果の一例を示す。図中の ΔP は、加熱部内差圧を、 P_s はサージタンク上部の圧力を示している。CASE 2の実験から以下のことがわかった。

- ・出口クオリティが0近傍で振動が観察され始める。
- ・加熱部内差圧とサージタンク上端の圧力振動の周期は一致しており、位相のみ逆転している。高周波成分の振動の周期は、始め 0.44 秒程度であるが質量速度が低下すると 1.2 秒程度に増加する。振幅も質量速度が低下すると増加し、密度波振動のみとなると見かけ上、差圧の振幅の大きさは一定する。そして、サージタンク上端の圧力波形から大きな振幅は消え、液面がわずかに振動する程度となる。
- ・高熱流束の場合には、低熱流束の場合と比べて圧力降下振動時の振幅が大きい。
- ・圧縮性空間の体積以外の条件を同一にし、圧縮性空間の体積が不安定流動に及ぼす影響を調べた。その結果、体積が 4.16 リットルと大きい場合には加熱部内差圧とサージタンク内圧力の振動周期が 4.4 秒程度となる圧力降下振動が観察された。しかし、体積が 0.66 リットルと小さい場合には加熱部内差圧の変動周期が $1 \sim 3$ 秒と短く、サージタンク内圧力の変動幅は小さく大きな周期性(圧力降下振動)が観察されなかった。この結果から、圧縮性空間の体積以外の条件が同じでも、圧縮性空間の体積により圧力降下振動等流動の不安定現象はまったく違ったものとなることがわかった。

(2) 限界熱流束特性

図2.30にCASE 2による限界熱流束実験の結果を示す。図2.28と図2.30から、圧力降下振動が発生する場合、CASE 1とCASE 2の2通りで限界熱流束特性が異なることがわかる。CASE 2ではCASE 1の山の部分がなく、低クオリティ領

域でのバーンアウトから急変して高クオリティ領域のバーンアウトに変化していることがわかる。そして、CASE 1 の結果と同様に、圧縮性空間の体積が大きいほど低クオリティ側でバーンアウトに至り易いことがわかった。

2. 3. 5. 不安定流動発生領域

限界熱流束の低下と不安定流動の関係を明らかにするために、不安定流動発生領域を実験的に調べた。図 2. 3 1 に不安定流動発生領域を調べた実験結果を示す。まず、圧縮性空間の体積を 0. 4 1 リットル、または 4. 1 6 リットルに設定し、熱流束を所定の値に設定した。そして、質量速度を小刻みにステップ状に低下させ、振動が発生し始めた点を記録した。この不安定流動発生位置を図 2. 3 1 上では、○で示した。この○の位置は、圧縮性空間の体積が大きい場合と小さい場合ではほぼ一致しており、不安定流動発生領域の下限は、圧縮性空間の体積に依存しないことがわかった。

実験では、さらに質量速度をステップ状に低下させ、圧力降下振動と密度波振動が併発する領域、そして圧力降下振動が消え密度波振動のみに遷移する点も記録した。図 2. 3 1 の低流量側の横線の領域では密度波振動のみが観察され、濃いハッチ部分では圧力降下振動と密度波振動の併発が観察された。また、図 2. 3 1 中の高流量領域では流量逸走により一振動の過程からバーンアウトに至った。圧力降下振動発生時には、密度波振動が常に併発しており、両振動の合成された波形を示した。そして、圧力降下振動と密度波振動の併発領域から密度波振動のみの領域へは、なだらかに現象が移行していた。この密度波振動のみに遷移する点を圧縮性空間の体積が 4. 1 6 リットルと 0. 4 1 リットルで測定した結果、両者は一致していた。この遷移境界点を□で示す。この結果から圧力降下振動発生領域の上限もまた圧縮性空間の体積に依存しないことがわかった。

質量速度を減少させ、流量不安定の発生点を測定したデータ点○は全て $X_{e,x} = 0$ 近傍にあり、振動は $X_{e,x}$ が少しでも 0 以上であれば大なり小なり発生し、高流量域では 1 回の振動を行う前にバーンアウトに至ることがわかった。

以上の実験結果をまとめると以下のようになる。

- ・密度波振動の発生領域は、 $X_{e,x} > 0$ の領域である。
- ・圧力降下振動の発生領域では、密度波振動も併発する。発生領域は $X_{e,x} > 0$ で、高流量であるほど発生領域は狭くなる。
- ・流量逸走は高流量で $X_{e,x}$ が正の 0 近傍で発生する。

2. 3. 6. 限界熱流束の低下と不安定流動の関係

図 2. 3 2 に不安定流動発生領域の実験結果と、CASE 1、CASE 2 による限界熱流束実験の結果、そして静圧力損失を測定した結果を重ねて示した。図 2. 3 2 から以下のことがわかった。

- ・限界熱流束は、圧力降下振動発生領域で $X_{e,x} = 0$ 近傍まで低下する。低下の割合は、圧縮性空間の体積に依存し、圧縮性空間の体積が大きいほど限界熱流束は低い熱流束まで低下する。ただし、低下の範囲は、圧力降下振動発生領域内である。
- ・また、不安定流動発生領域は、加熱部の静圧力損失特性に依存する。 $X_{e,x} < 0$ での流動様式はおおよそ液単相流と考えられる。そのため、流動の不安定性は生じない。しかし、 $X_{e,x} > 0$ となり加熱部内に沸騰二相流領域が発生し、そのため $\Delta P - G$ グラフ上で負の勾配を持つ領域が生じた場合、密度波振動を伴う圧力降下振動が発生する。
- ・圧力降下振動発生領域では、加熱部入口の流量が振動を繰り返す。この流量振動の振幅は、圧縮性空間の体積が大きいほど大きいと考えられる。そのため圧力降下振動発生領域では、圧縮性空間の体積が大きいほど限界熱流束が大きく低下すると考えられる。
- ・CASE 1 の結果のような極小値をもつ限界熱流束特性となる理由として、加熱部出口での一時的なポストドライアウト現象が考えられる。すなわち、出口である時間間隔だけドライパッチが発生するが、それが熱容量等で決定される限界値を超えたら、壁温が上昇し続け物理的バーンアウトに至るものと考えられる。

§ 2. 4. 結言

本章では、小口径円管内強制流動沸騰に関する幾種類もの実験を行い得られた結果をまとめた。以下に、本実験によって明らかとなった点を示す。

- (1) 水平に設置した小口径円管内沸騰流の圧力損失特性を測定し、得られた実験結果と簡単なモデルによる予測値とを比較した。比較結果から、摩擦損失の計算を Martinelli-Nelson の整理法で計算し、加速損失の計算には、環状流モデルを基礎とし、Smith の式でボイド率を計算したモデルが最も実験結果に近い値を予測することがわかった。
- (2) 管内径、質量速度および加熱部入口からの距離が熱伝達率に及ぼす影響を調べた。その結果、管内径が小さくなると熱伝達率が低下すること、質量速度の影響は局所クオリティが 0 以下で顕著であり質量速度が大きいほど熱伝達率が高くなること

がわかった。そして、液単相領域では通常口径管と同様に熱的助走区間が存在し入口からの距離が小さいほど熱伝達率が高く壁温が低くなること、全ての実験条件で $Nu - X$ グラフ上で $X = 0$ を境に特性が変わる共通点があることがわかった。

- (3) 主要パラメータが限界熱流束に及ぼす影響を調べた。実験の結果、同じ L/D の場合、基本的には管内径が小さいほど限界熱流束が高い値となり、特に中間クオリティ領域で、管内径の影響が顕著である。 L/D が限界熱流束に及ぼす影響を詳細に調べた結果、 L/D が小さいほど限界熱流束が高くなり、その増加率は L/D が小さいほど、また質量速度が大きいほど大きい。また、入口水温の影響を、出口クオリティの関数として整理した結果、低流速では、データがばらつく特殊な領域を除くと入口サブクール度に依存しないこと。そして、高流速で出口クオリティが0近傍でバーンアウトする領域では、限界熱流束は出口クオリティが0近傍で最小値をもち、サブクール領域では入口サブクール度が大きいほど限界熱流束が高くなることがわかった。
- (4) 不安定流動時の熱水力特性、限界熱流束特性、そして不安定流動発生領域を実験により明らかにした。実験の結果、加熱部内差圧の静圧力特性で、圧力勾配が負となる流量範囲で圧力降下振動が発生する。圧力降下振動発生領域は、出口クオリティが0以上の低い値の領域であり、この流量範囲内では限界熱流束が圧力降下振動発生領域内まで低下する。そして、不安定流動発生領域は圧縮性空間の体積に依存しないが、限界熱流束は圧縮性空間が大きいほど顕著に低下する。また、限界熱流束特性に関して、CASE 1 と CASE 2 の2通りで特性が異なることがわかった。

表 2. 1 熱伝達実験の実験条件

DIAMETER D [mm]	HEATED LENGTH L [mm]	MATERIAL	THICKNESS [mm]	INLET WATER TEMPERATURE T_{in} [°C]	MASS VELOCITY G [kg/m ² s]
2.0	100	Ni	0.5	20	500, 1000, 5000
	360	Ni	0.5	20	500, 1000, 5000
2.2	10	Ni	0.5	10, 15	150 - 13000
	22	Ni	0.5	10, 15	150 - 13000
	113	Ni	0.5	10, 15	900 - 13000
6.0	30	SUS304	1.0	10, 15	0 - 400
	360	Ni	1.0	20	100, 500, 1000, 5000

表 2. 2 限界熱流束実験の実験条件

DIAMETER D [mm]	HEATED LENGTH L [mm]	L/D [-]	MATERIAL	THICKNESS [mm]	INLET TEMP. [°C]	NUMBER OF CHF DATA
1.0	5	5	SUS316	0.5	10	15
	10	10	SUS316	0.5	10	13
	25	25	SUS316	0.5	10	13
	50	50	SUS316	0.5	10	8
	100	100	SUS316	0.5	10	9
2.0	10	5	SUS316	0.5	10	19
	20	10	SUS316	0.5	10	17
	50	25	SUS316	0.5	10	14
	100	50	SUS316	0.5	10	10
2.2	11	5	Ni	0.5	10	16
	22	10	Ni	0.5	10	12
	55	25	Ni	0.5	10-90	3
	113	51.5	Ni	0.5	10	13
4.0	20	5	Ni	0.25	10	7
	40	10	Ni	0.25	10	3
	100	25	Ni	0.25	10	4
	200	50	Ni	0.25	10	2
	4	1	SUS316	1.0	10	27
	20	5	SUS316	1.0	10	17
	40	10	SUS316	1.0	10	17
	100	25	SUS316	1.0	10	22
6.0	200	50	SUS316	1.0	10	23
	30	5	Ni	1.0	10,50,90	55
	60	10	Ni	1.0	10,50	51
	150	25	Ni	1.0	10-100	95
	300	50	Ni	1.0	10	45
	30	5	SUS316	1.0	10-100	335
	60	10	SUS316	1.0	10	17
	150	25	SUS316	1.0	10-100	120
	300	50	SUS316	1.0	10	19
	680	113	SUS316	2.0	30	55
TOTAL RANGE						
1.0-6.0	4.0-680.0	1-113			10-100	1076

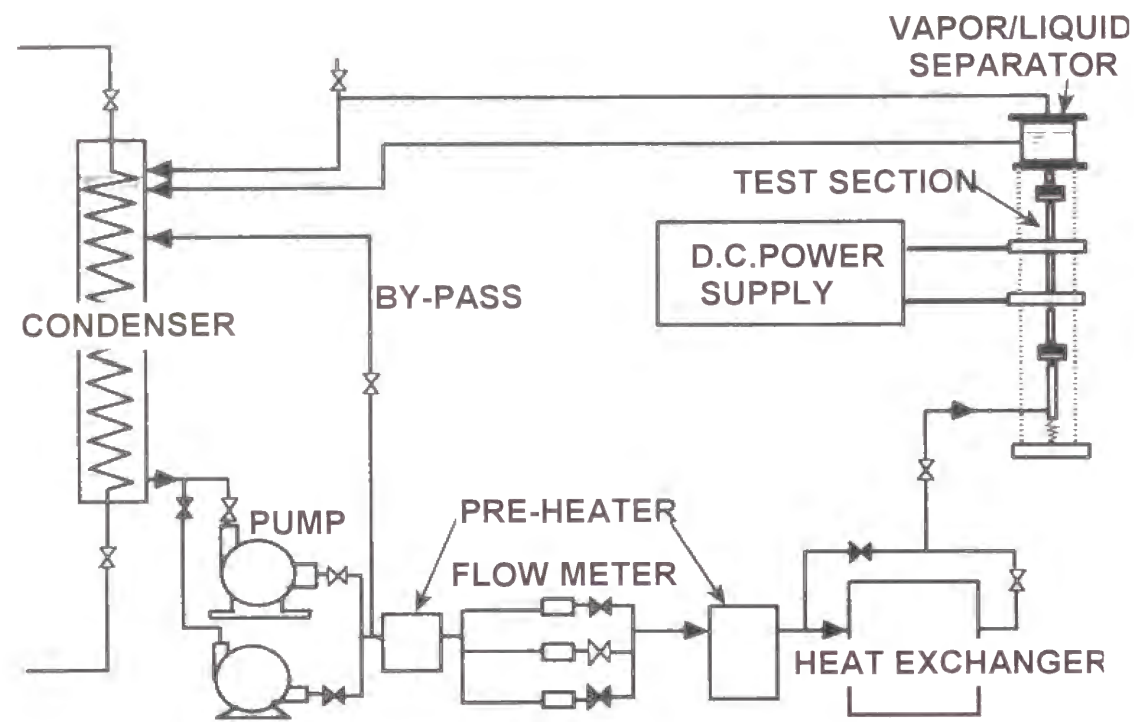


図2. 1 実験ループの概略図

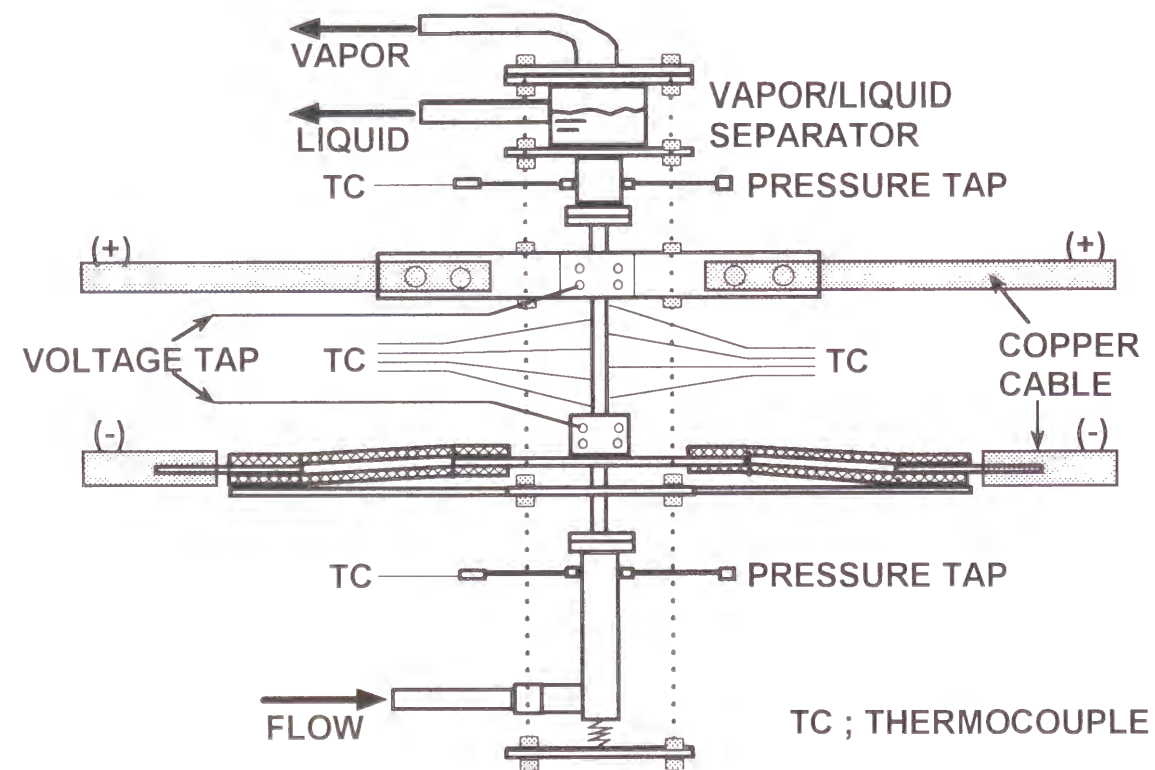


図2. 2 Aタイプ試験部の概略図

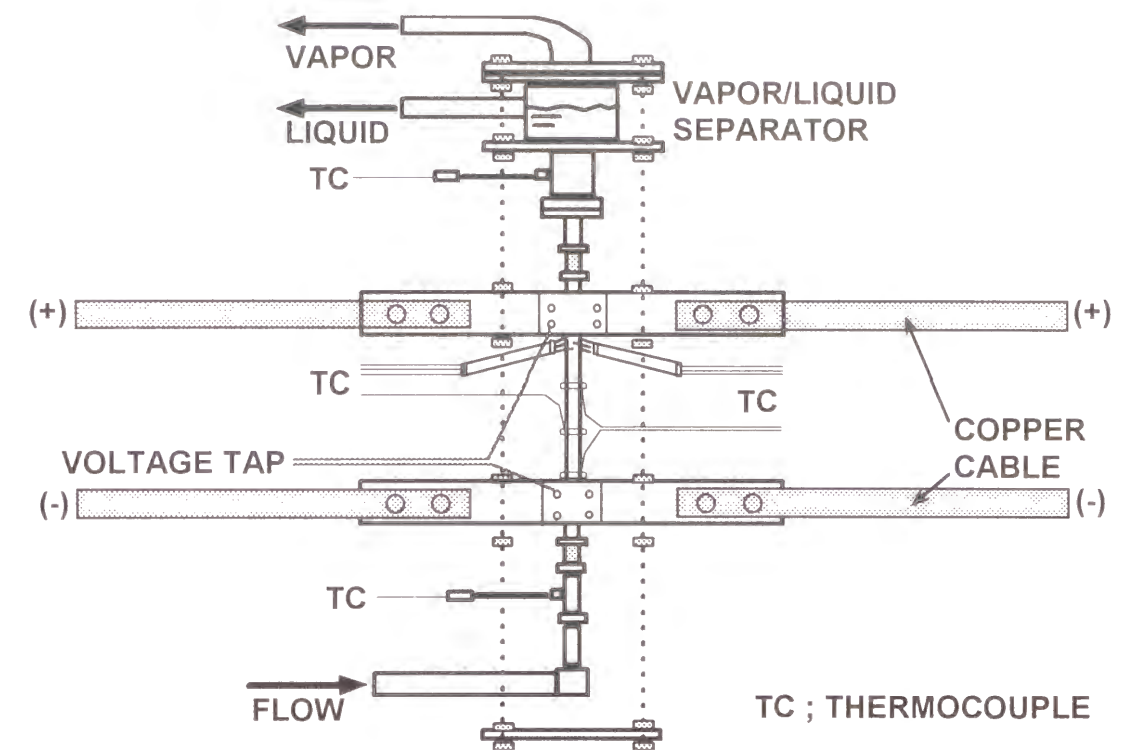


図2. 3 Bタイプ試験部の概略図

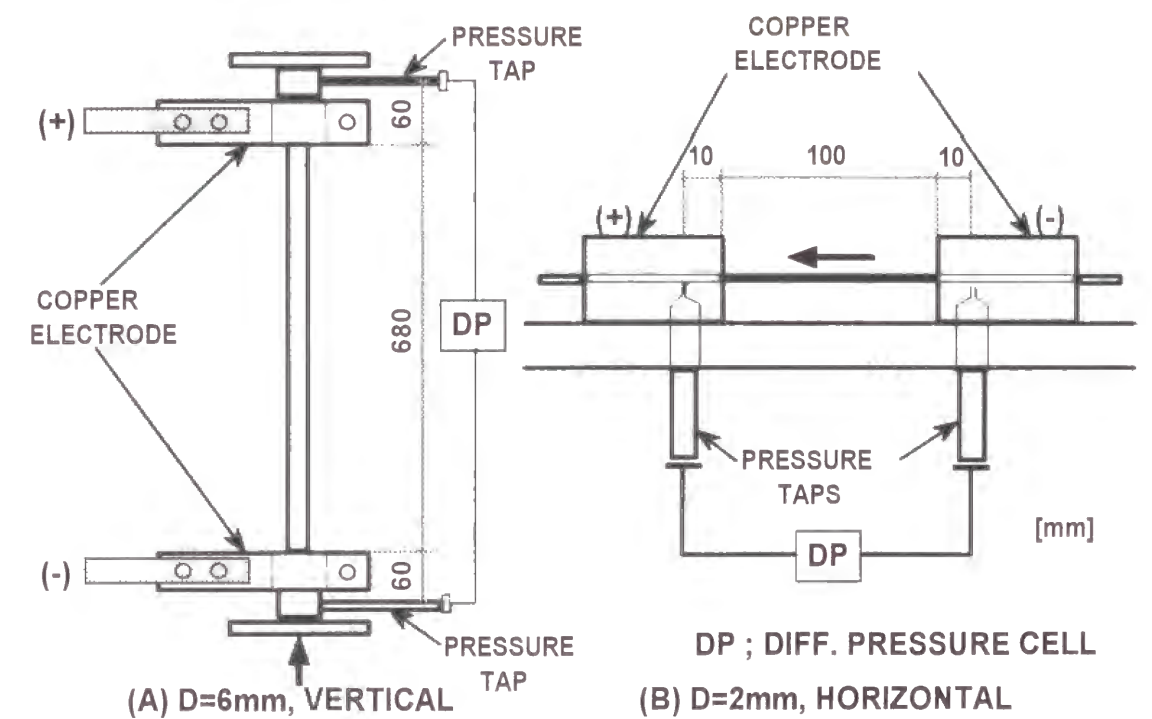


図2. 4 圧力損失測定用試験部の概略図

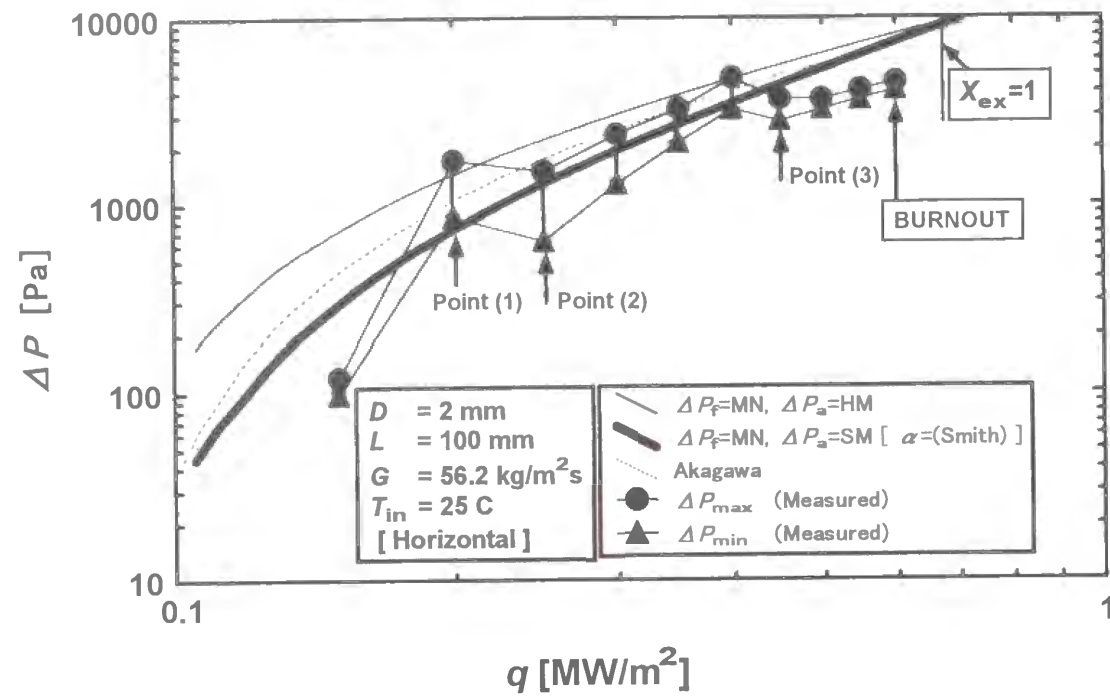


図2.5 小口径沸騰管内での圧力損失特性

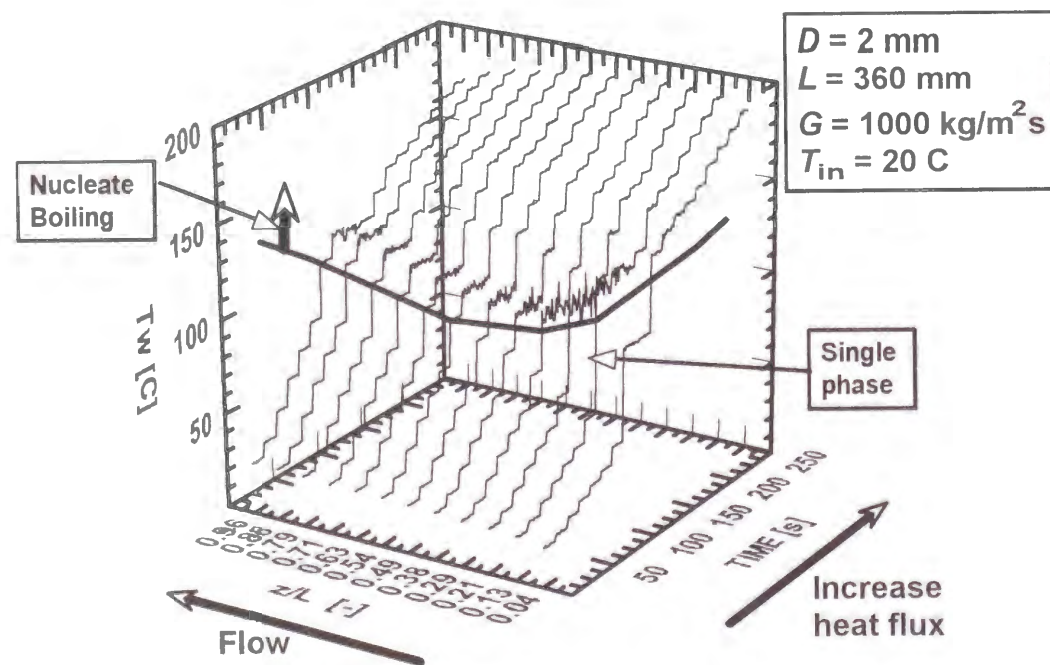


図2.6 熱流束上昇に伴う軸方向の壁温の変化

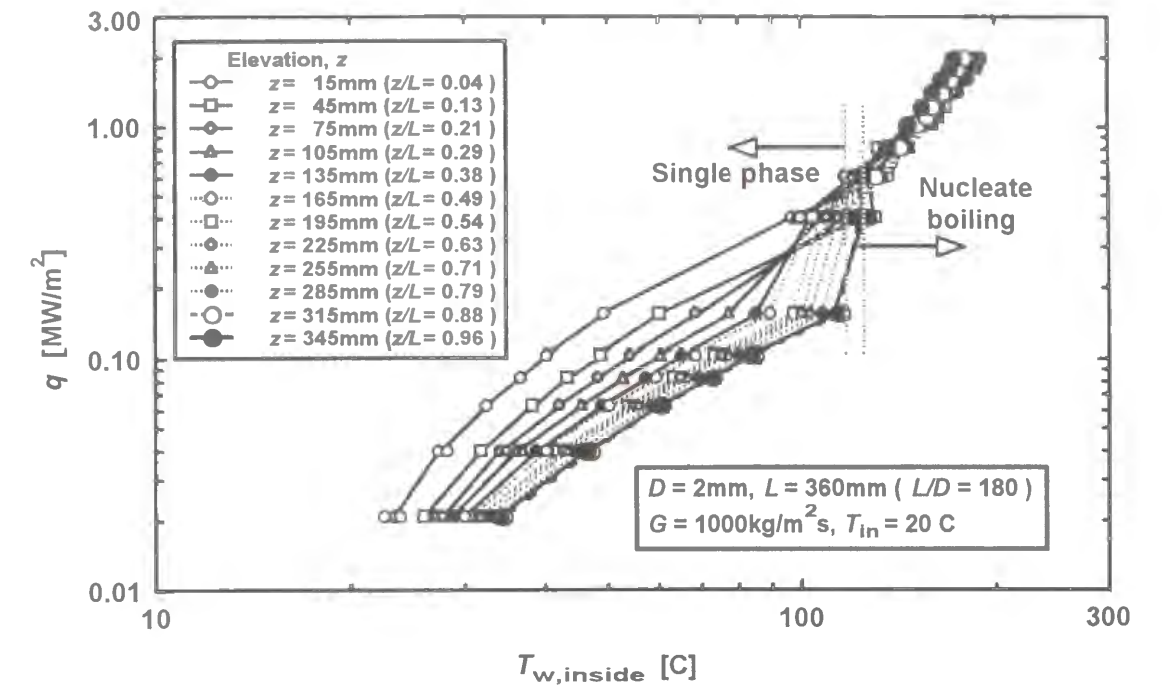


図2.7 壁面温度と熱流束の関係 (D = 2 mm)

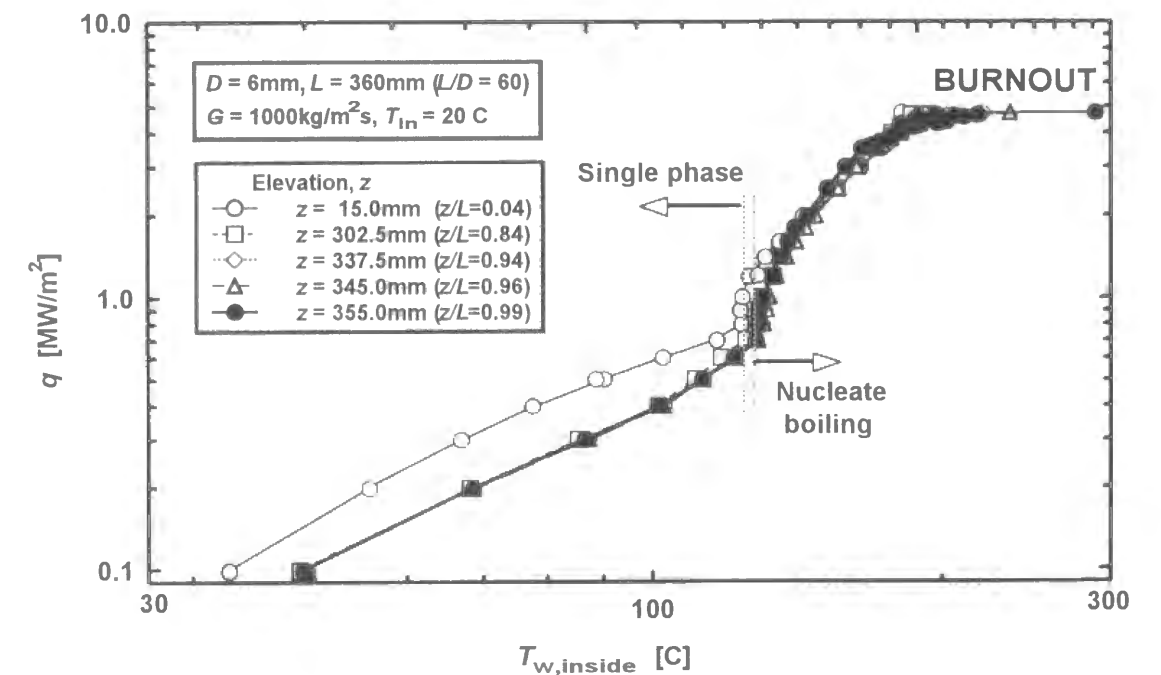
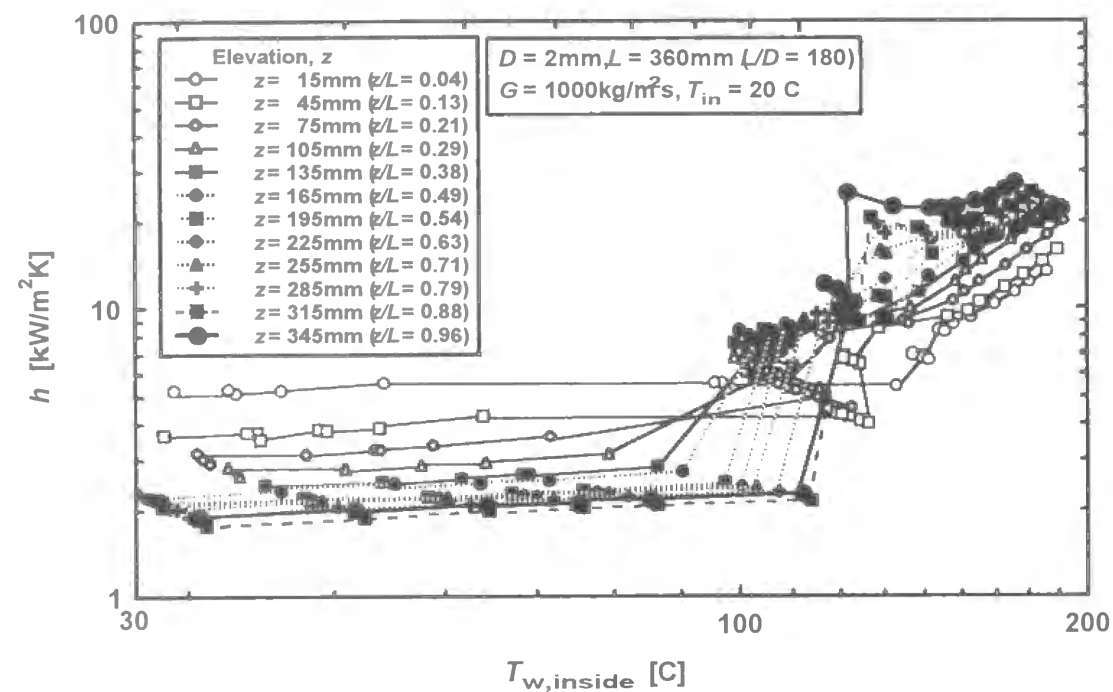
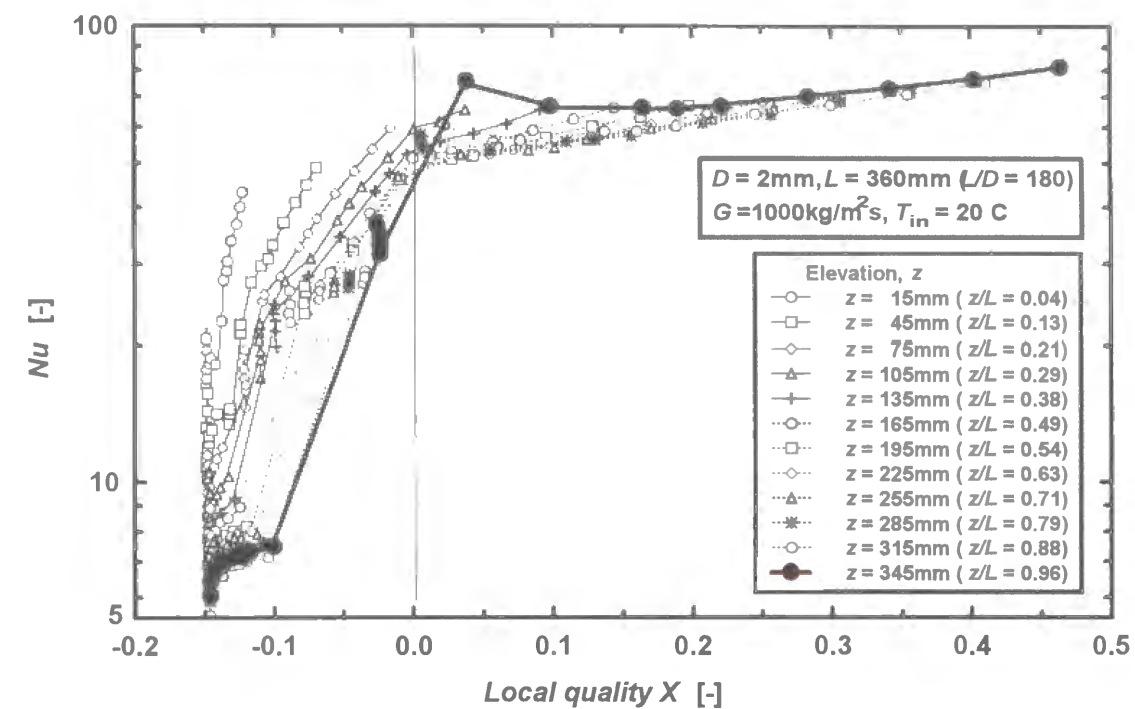
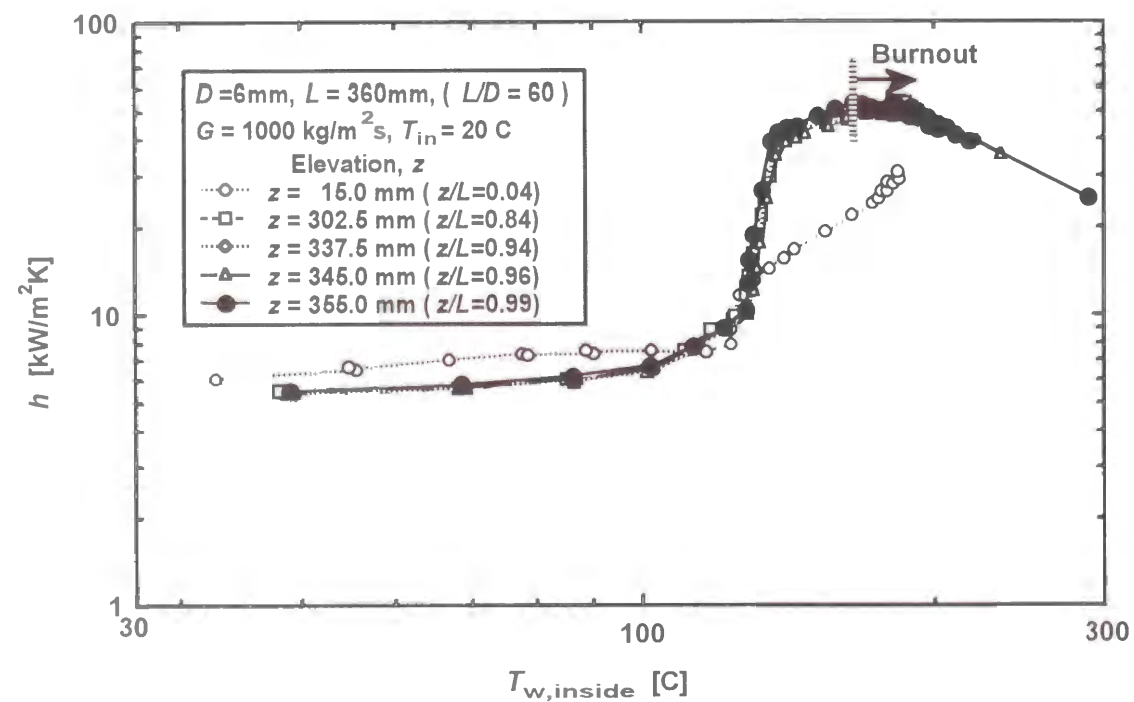
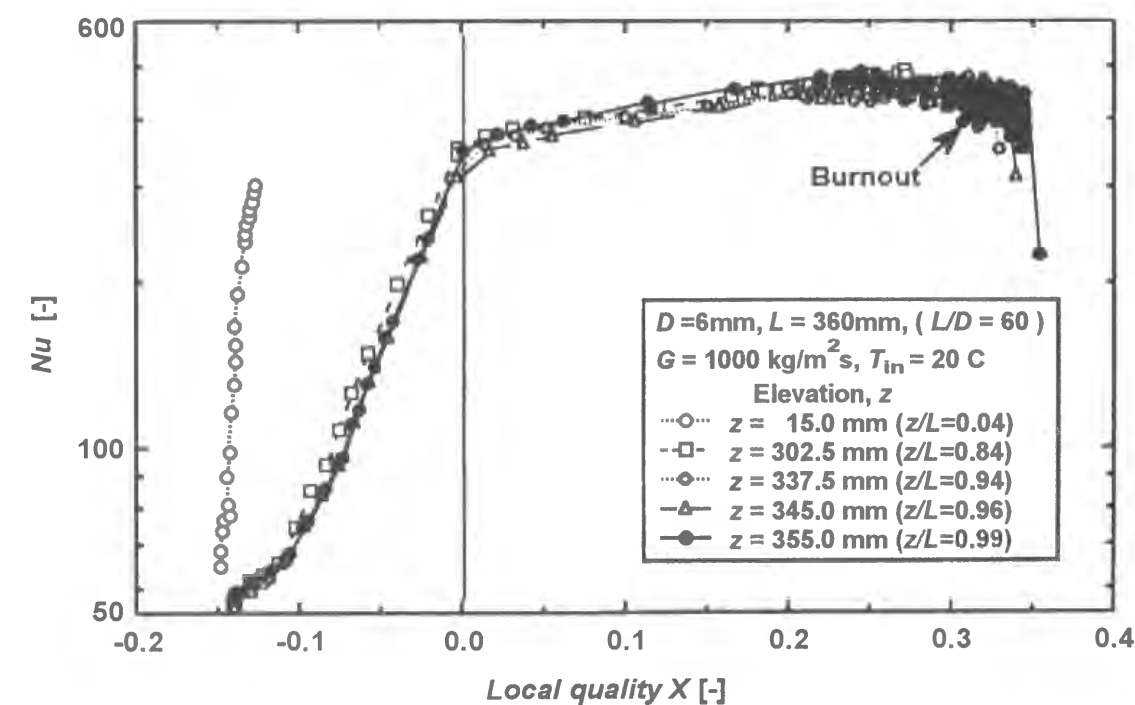


図2.8 壁面温度と熱流束の関係 (D = 6 mm)

図2. 9 壁面温度と熱伝達率の関係 ($D=2$ mm)図2. 11 局所クオリティとヌッセルト数の関係 ($D=2$ mm)図2. 10 壁面温度と熱伝達率の関係 ($D=6$ mm)図2. 12 局所クオリティとヌッセルト数の関係 ($D=6$ mm)

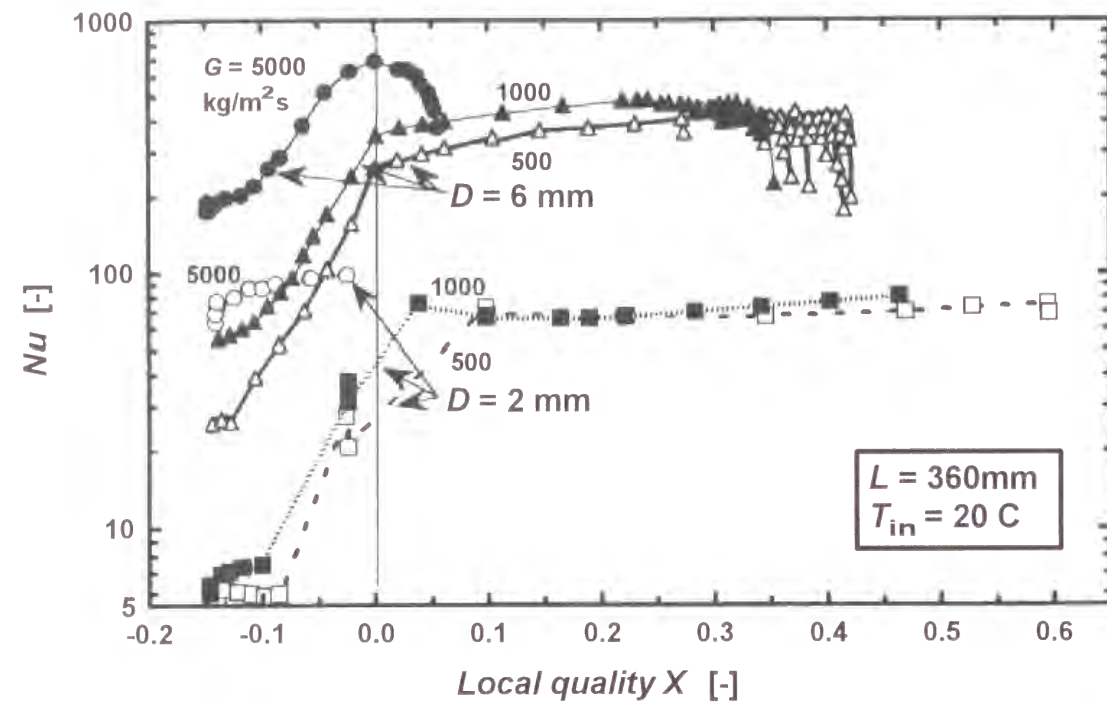


図2. 13 管内径と質量速度のヌッセルト数に及ぼす影響

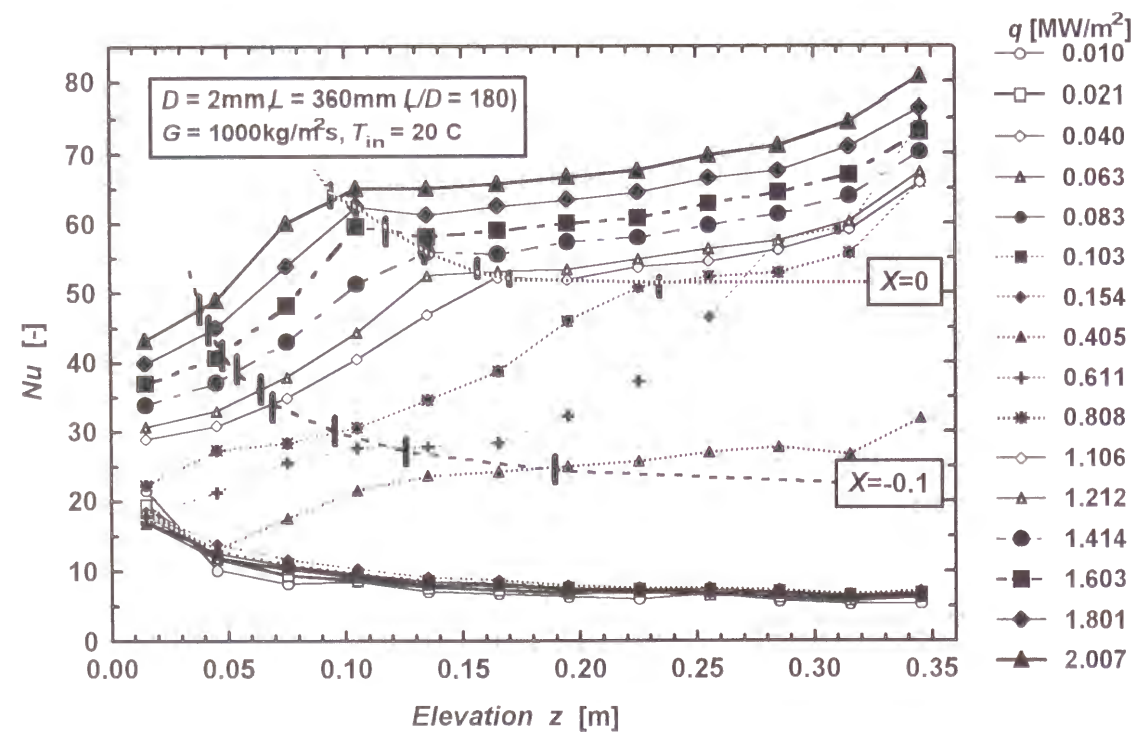


図2. 14 熱流束上昇に伴う軸方向のヌッセルト数の変化

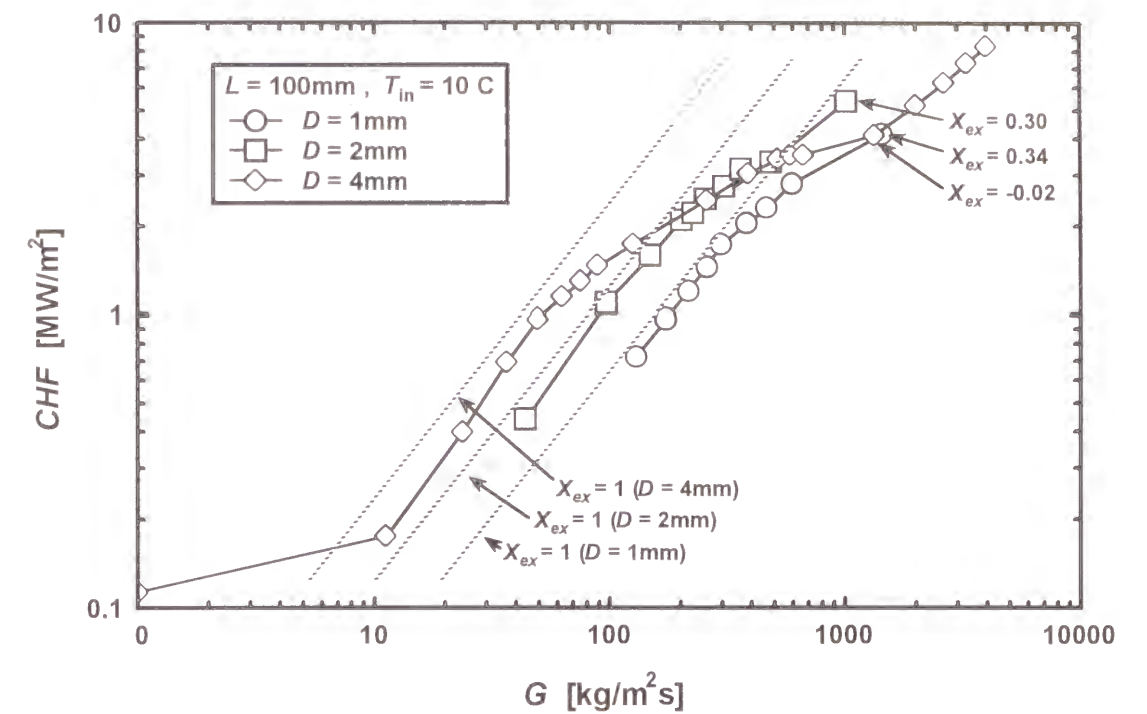
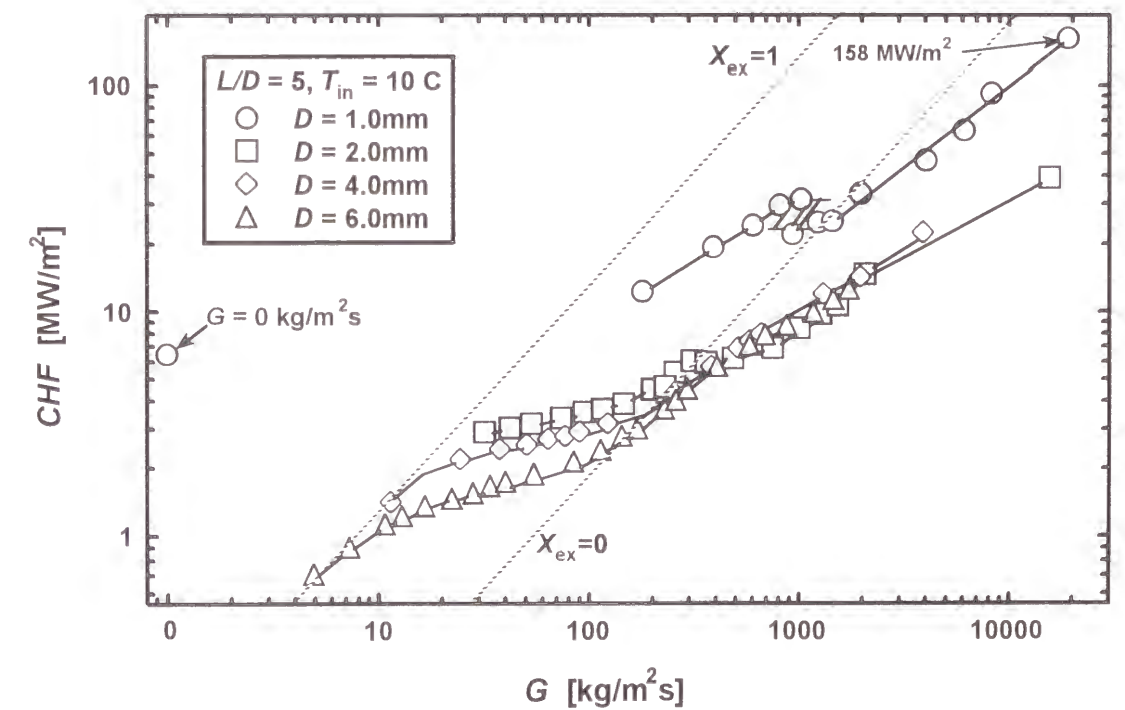
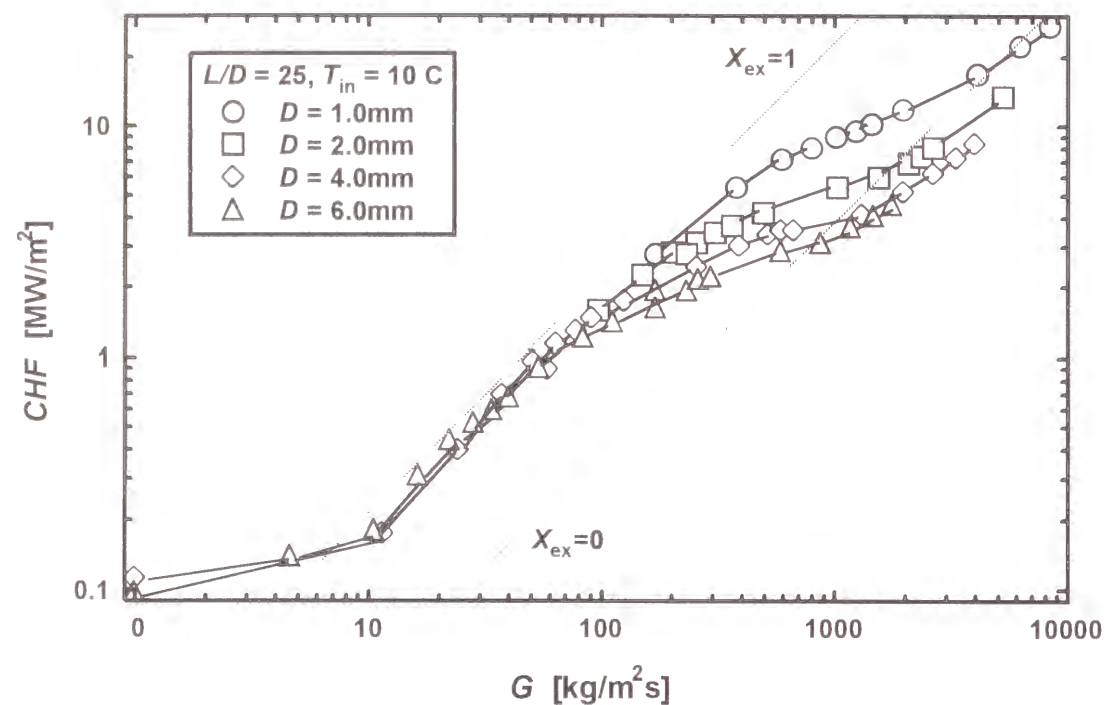
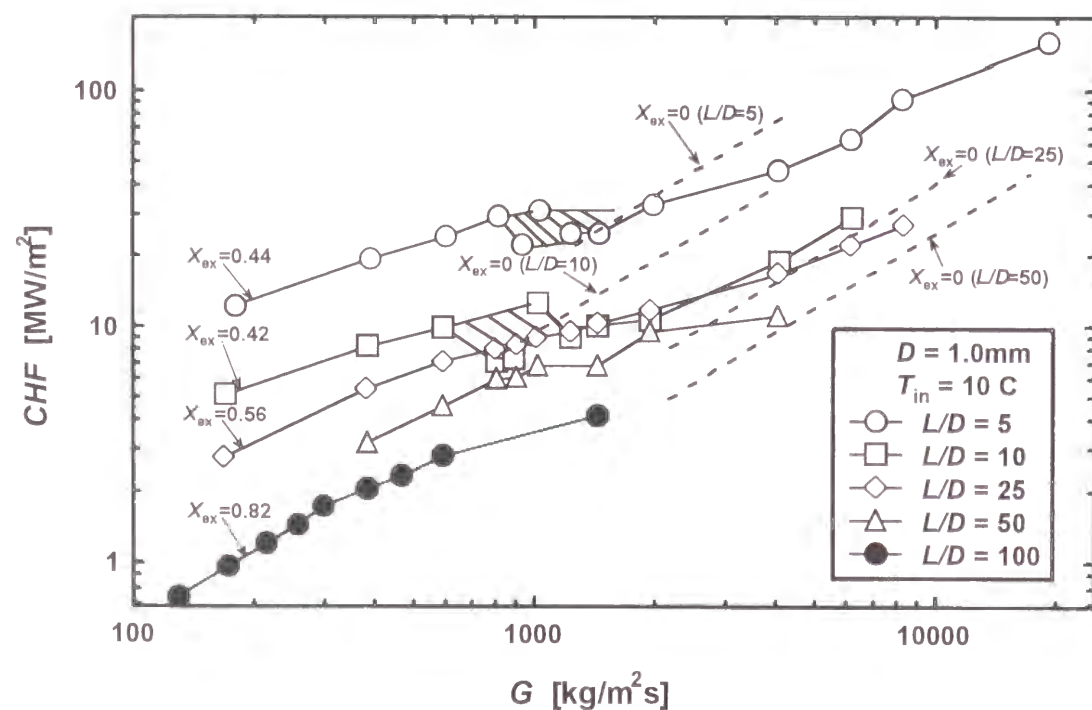
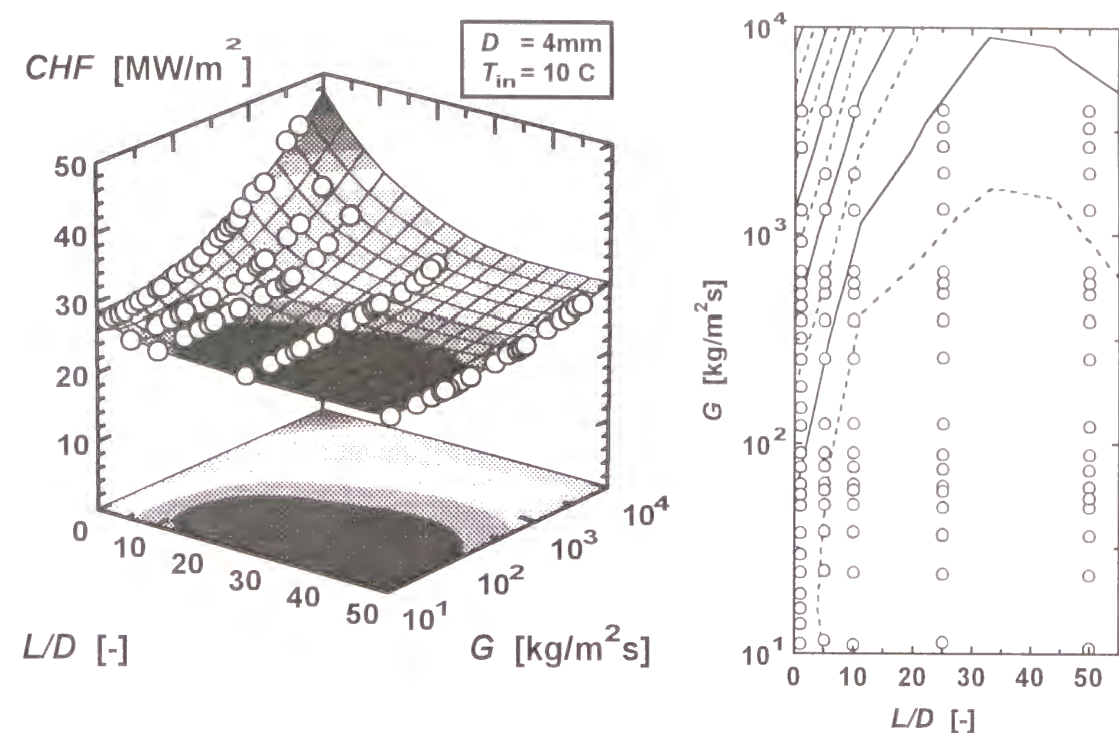
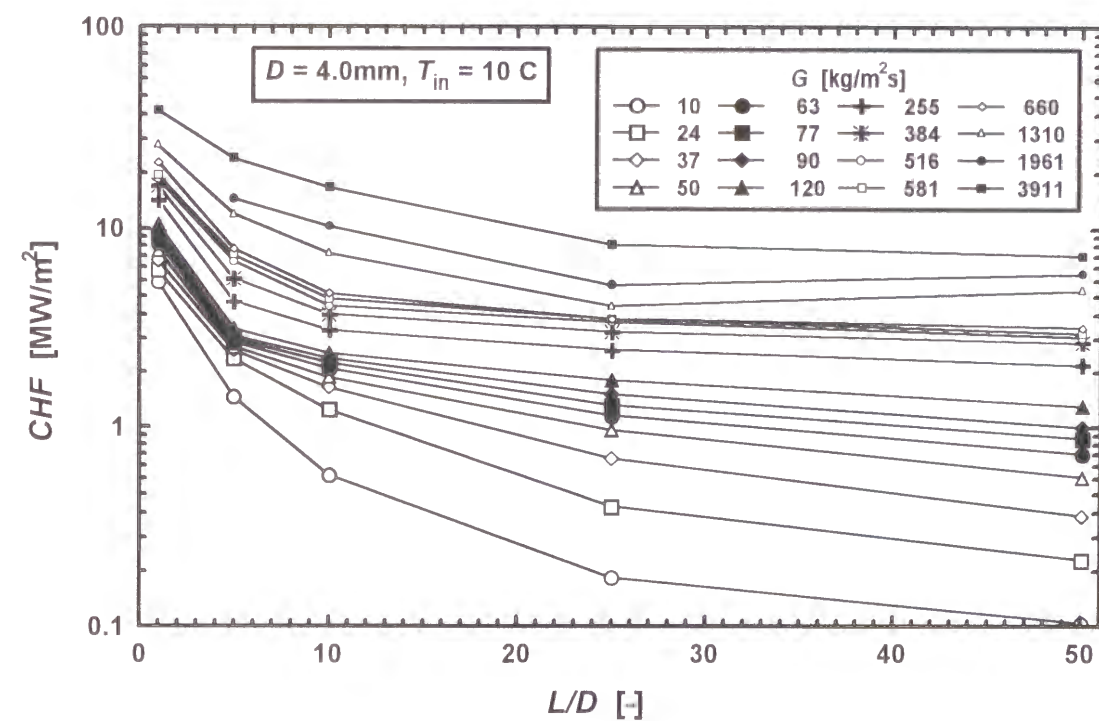


図2. 15 加熱部長さが100 mm での管内径の限界熱流束に及ぼす影響

図2. 16 管内径の限界熱流束に及ぼす影響 ($L/D = 5$)

図2. 17 管内径の限界熱流束に及ぼす影響 ($L/D=25$)図2. 18 L/D の限界熱流束に及ぼす影響 ($D=1\text{ mm}$)図2. 19 L/D と質量速度と限界熱流束の関係図2. 20 L/D の限界熱流束に及ぼす影響

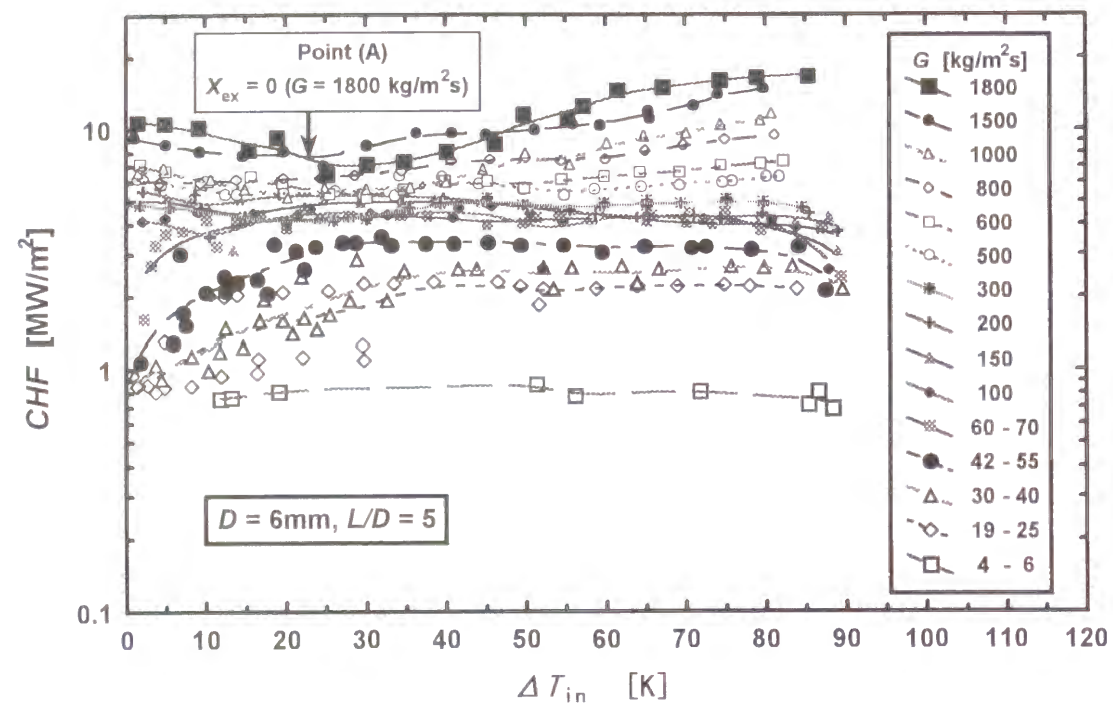


図2. 21 入口サブクール度の限界熱流束に及ぼす影響

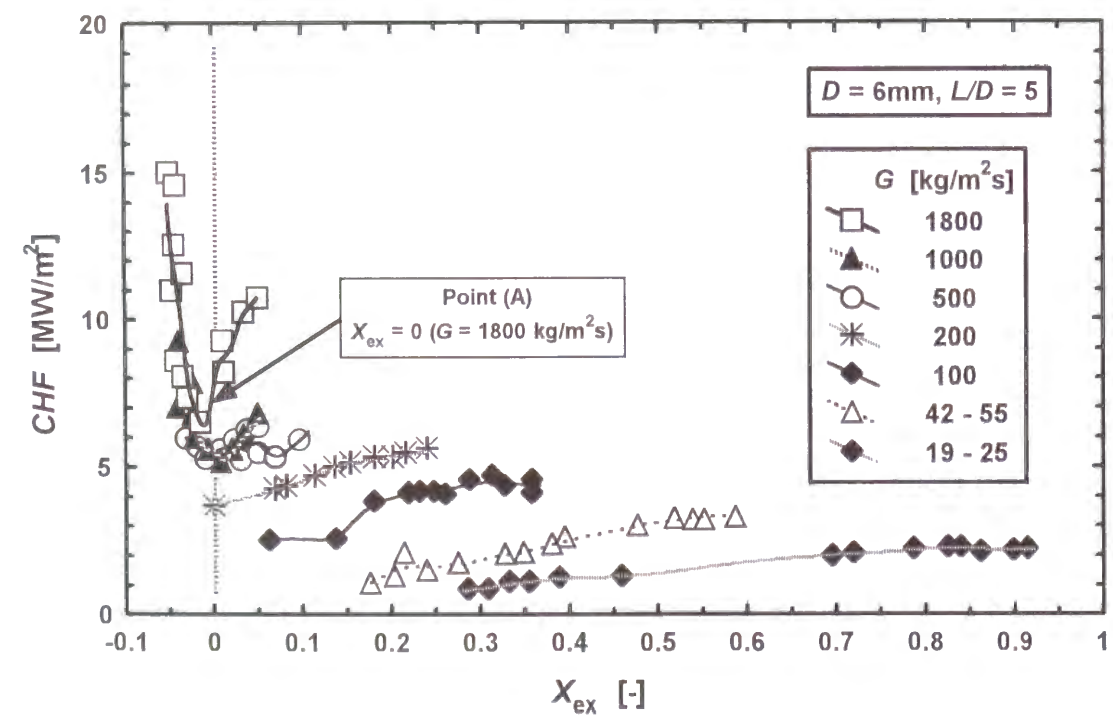


図2. 22 出口クオリティと限界熱流束の関係

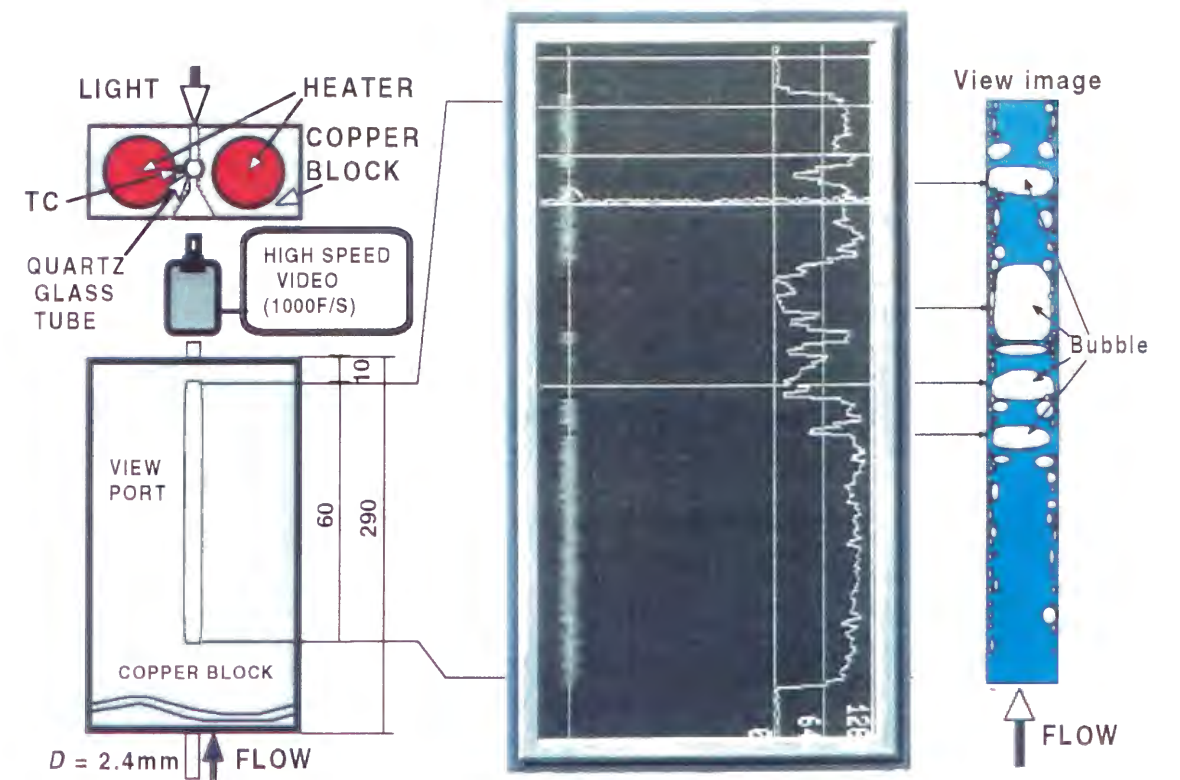


図2. 23 Aタイプ可視化試験部と観察例

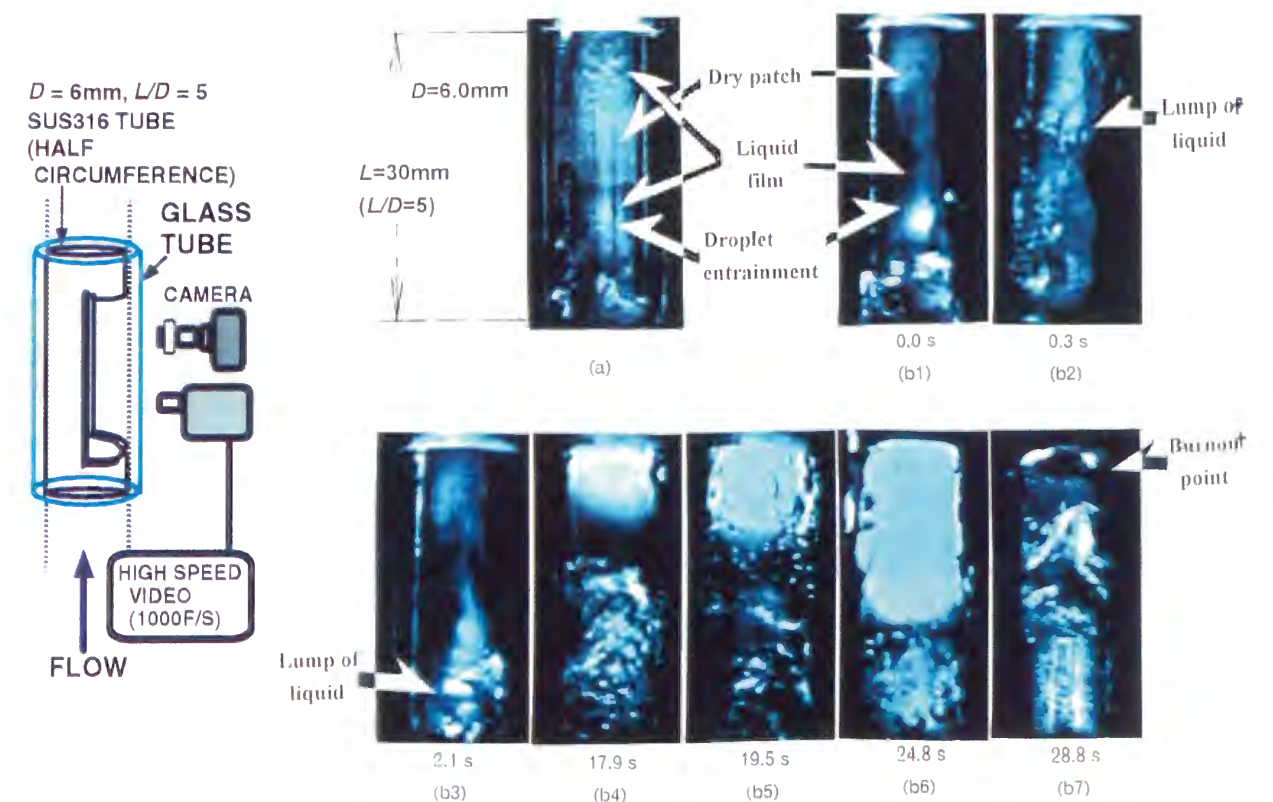


図2. 24 Bタイプ可視化試験部と観察例

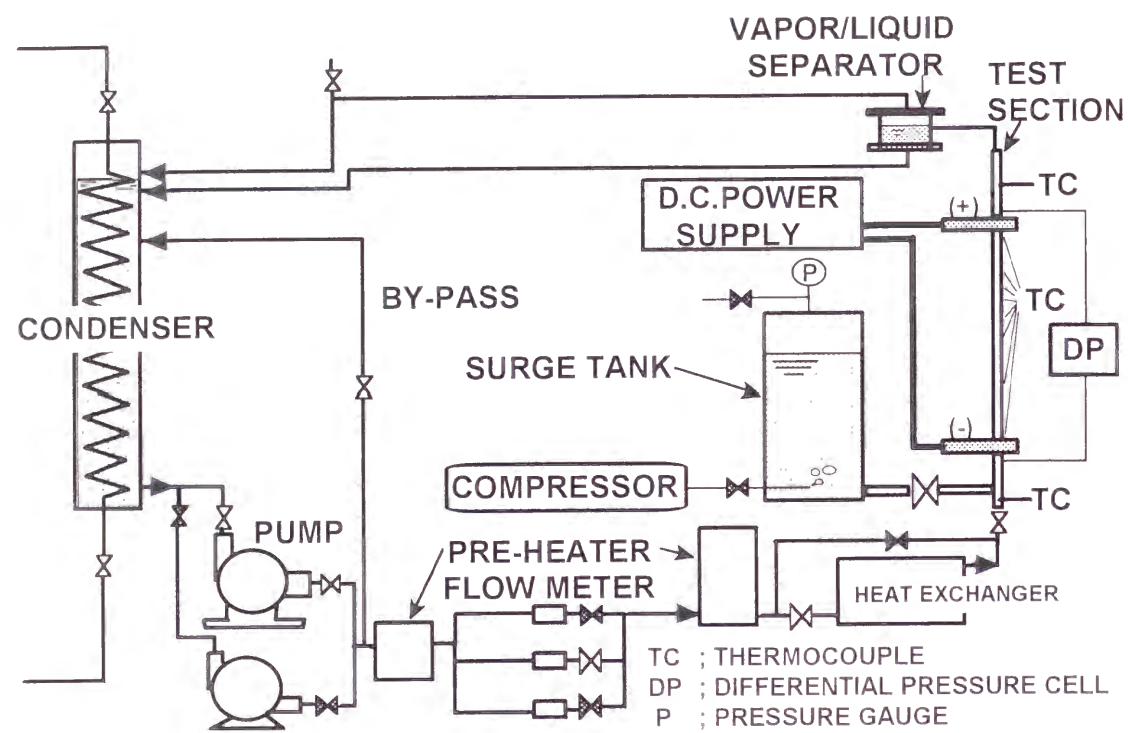


図 2. 25 不安定流動実験用ループの概略図

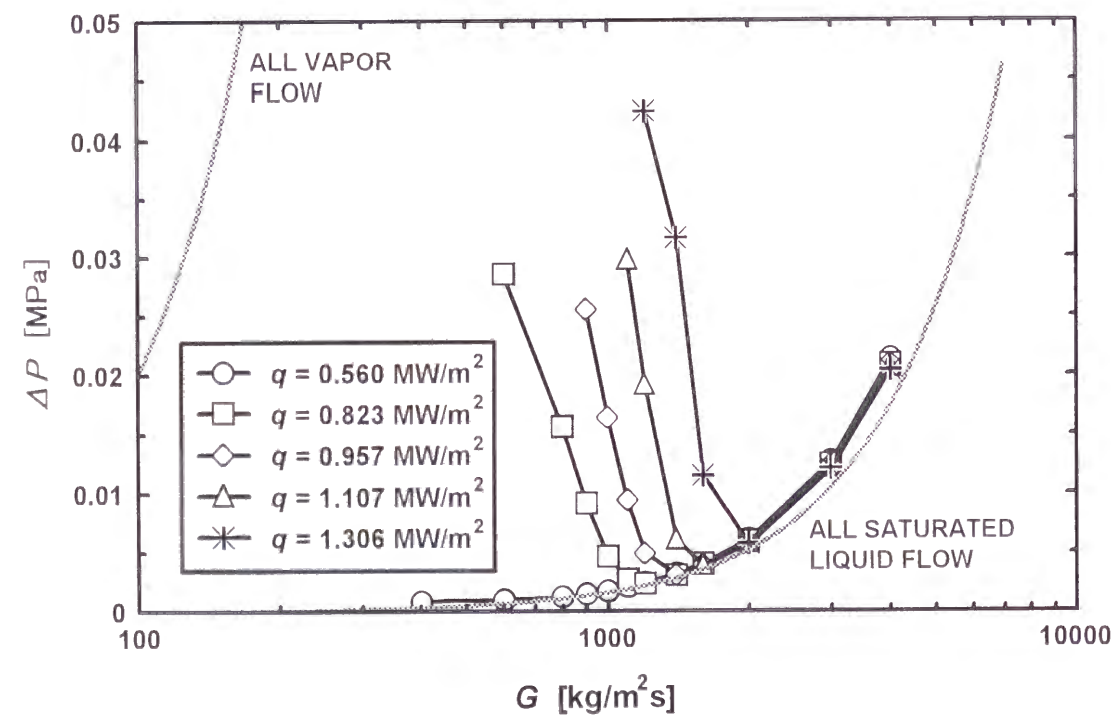


図 2. 26 小口径円管内での静圧力損失特性

Case 1 : $G = 448 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $V = 4.16 \text{ liter}$

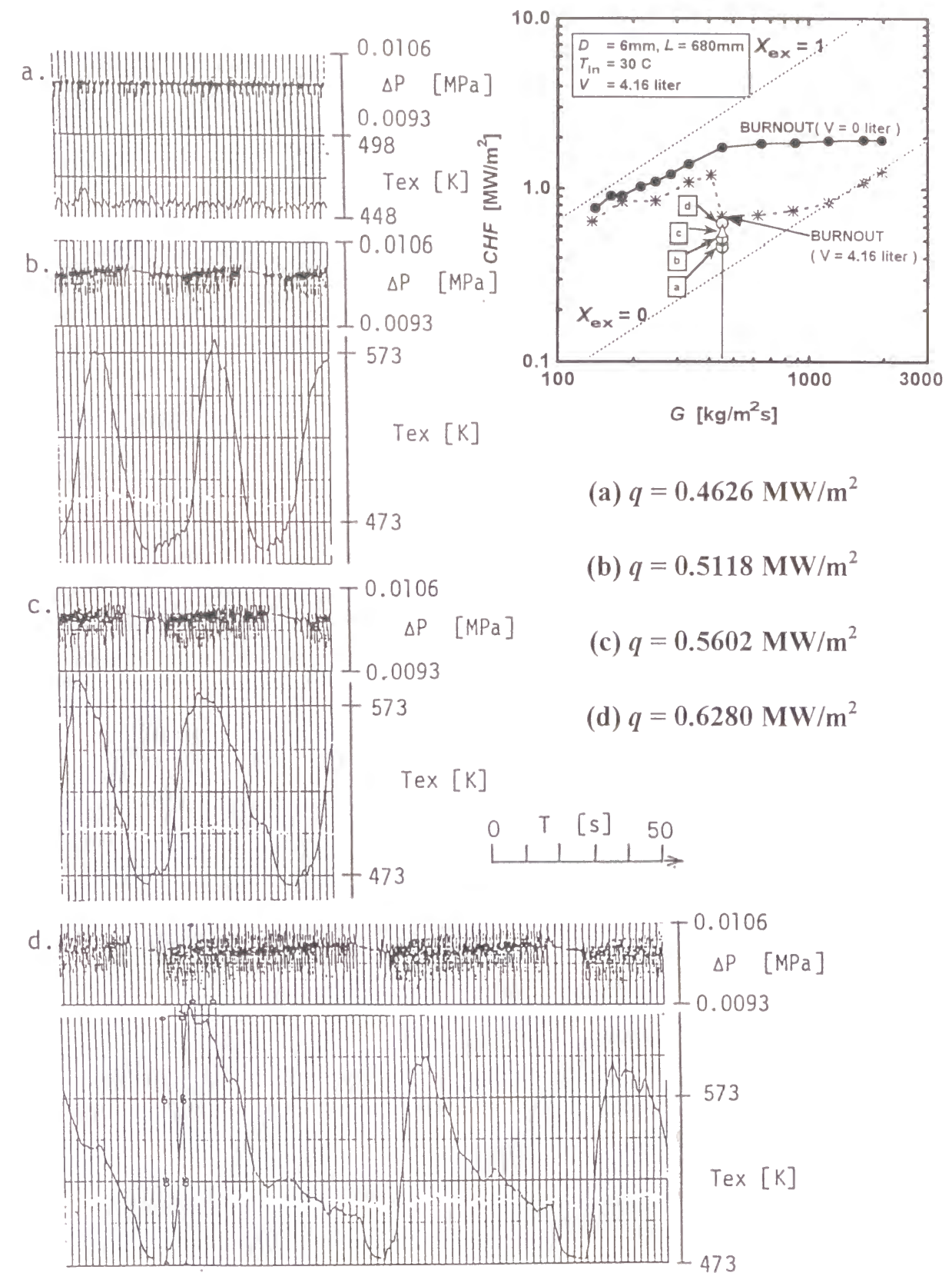


図 2. 27 加熱部内差圧と壁温の振動 (CASE 1)

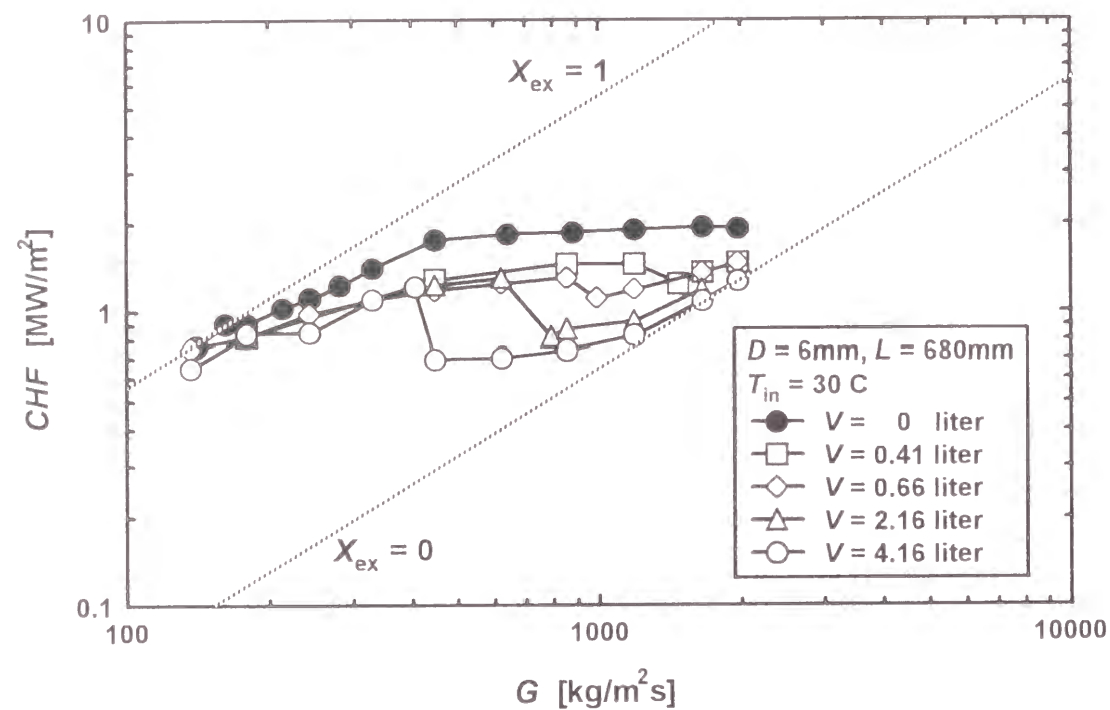


図2.28 流動の不安定性が限界熱流束に及ぼす影響 (CASE 1)

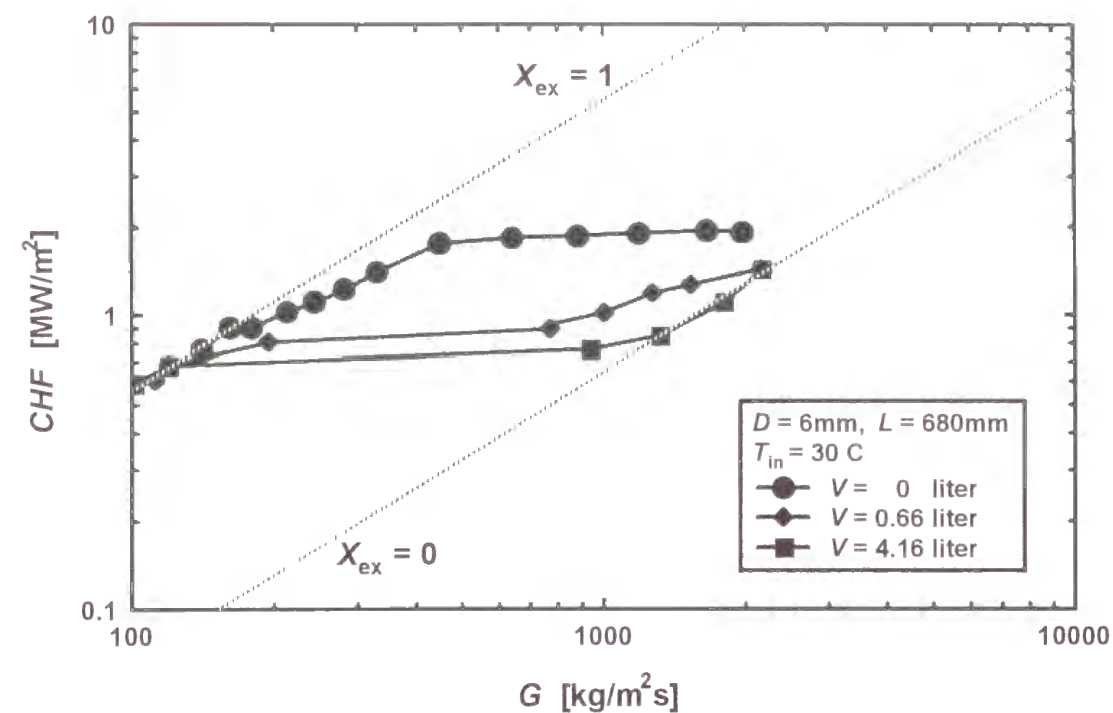


図2.30 流動の不安定性が限界熱流束に及ぼす影響 (CASE 2)

Case 2 :

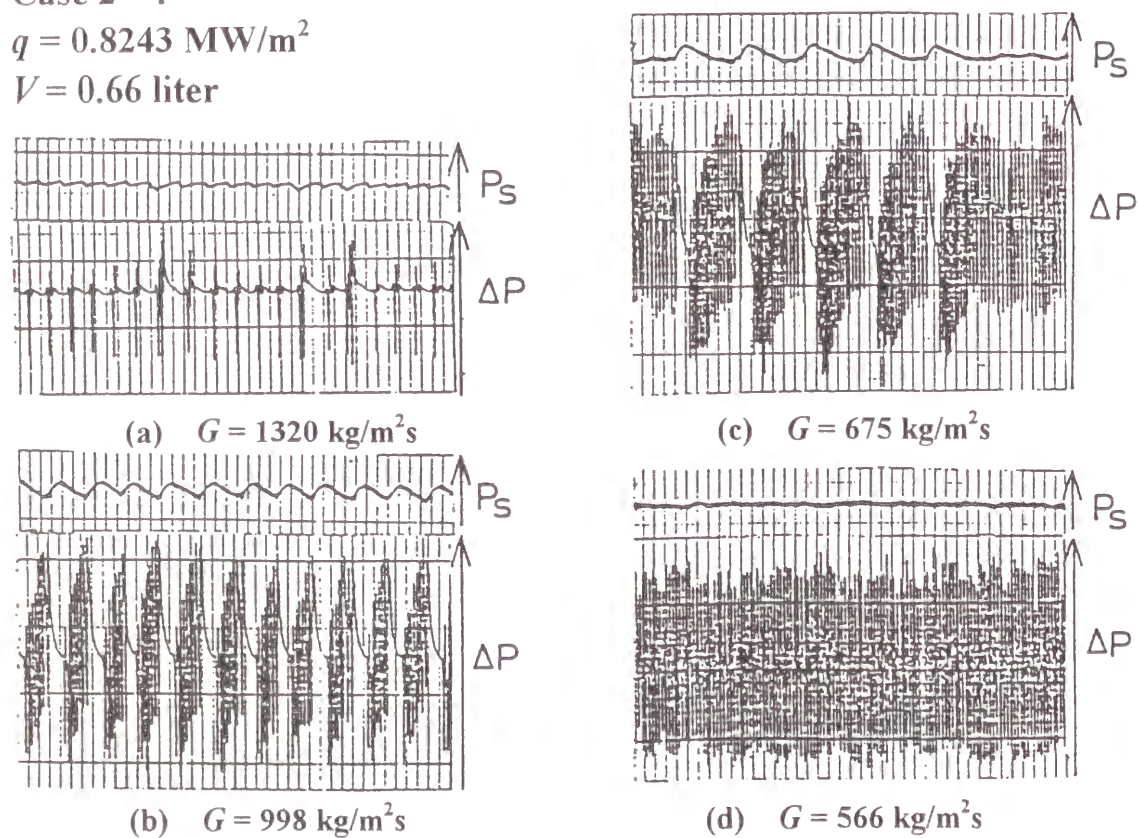
 $q = 0.8243 \text{ MW/m}^2$ $V = 0.66 \text{ liter}$ 

図2.29 サージタンク内圧力と加熱部内差圧の振動例 (CASE 2)

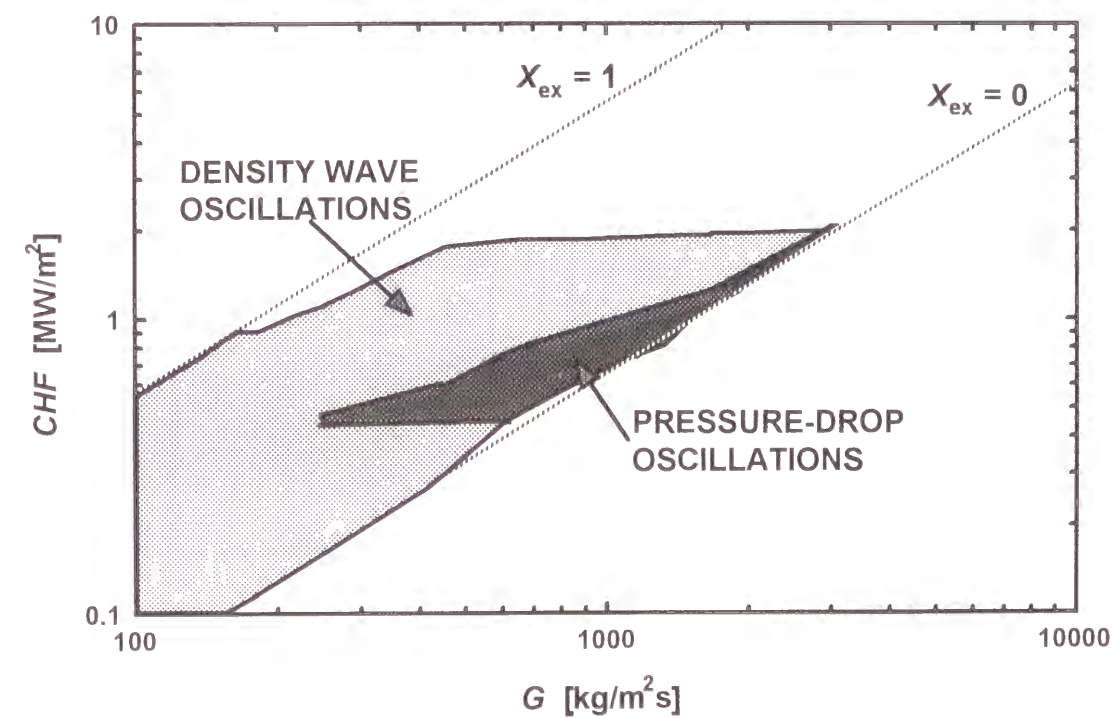


図2.31 不安定流動発生領域

第3章 小口径円管内強制流動熱伝達

§ 3. 1. 緒言

小口径円管内での強制流動液単相流および沸騰二相流の壁面熱伝達は、核融合炉のプラズマ対向機器、高出力加速器、大型放射光のターゲット機器等高熱負荷機器の熱工学的設計と関連して重要である。現在まで、管内径が8 mm以上の管に関しては、熱交換器や原子炉の安全解析等と関連して多くの研究報告がなされている。しかし、小口径円管を対象とする研究は、作動流体が水で高熱流束に達する領域までの研究報告は見あたらない。三島ら（1996）による断熱二相流研究からも分かるように、小口径円管内での二相流特性はChisholm（1967）のパラメータCが通常口径円管とは異なる等、小口径円管内での流動特性が通常口径円管とは異なっている。そのため、通常口径円管を対象に提案された相関式やモデル式は、その適用範囲から外れるため予測精度の低下が考えられる。

そこで、本研究では小口径円管内強制流動液単相流および沸騰二相流に関し、既存の熱伝達率相関式と実験結果を比較・検討し、適切な式をそれぞれ示すことを目的とした。

§ 3. 2. 液単相強制対流領域の壁面熱伝達特性

3. 2. 1. 既存の熱伝達率相関式の評価

図3. 1に管内径 D が2 mm、加熱部長さ L が360 mmで、質量速度 G が1000 kg/m²sでの実験結果と既存の熱伝達率式や後述するDittus-Boelter式（1930）の修正式による計算値の比較結果を示す。

図3. 1では、管入口でのレイノルズ数は1994と小さいため層流用の式である $Nu=4.0$ （TRAC-PF1およびBF1コードの構成式として採用されている。）、 $Nu=4.36$ （RELAP5/MOD2コードの構成式として採用されている。）、および次式で表されるCollierの式（1972）を比較のために示した。

・ Collierの式（1972） 適用範囲： $Re < 2000$

層流域で低流速のときには、浮力の項が無視出来なくなって浮力により熱伝達が促進される。Collierの式は、浮力による影響を考慮している。

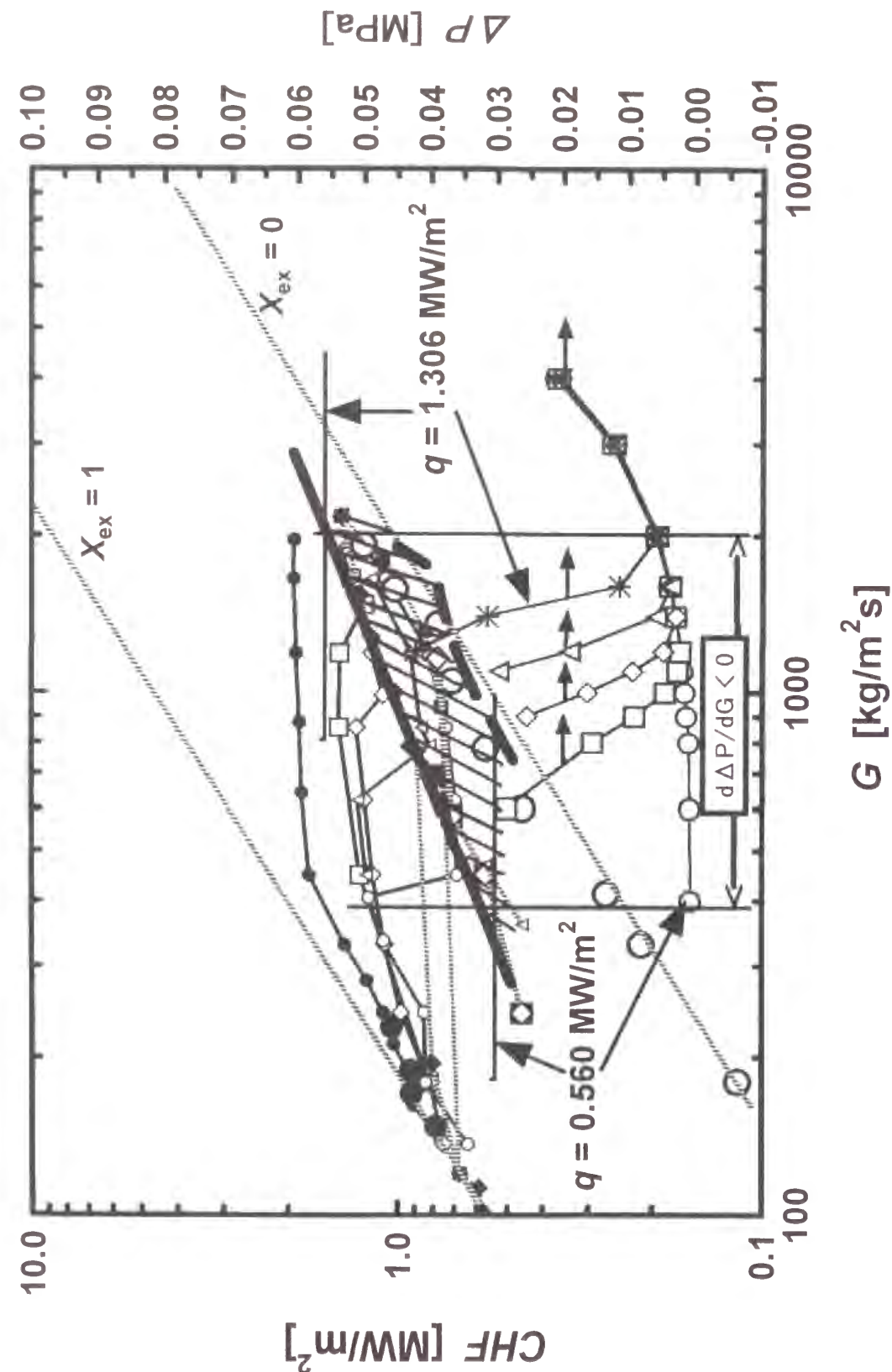


図2. 3.2 限界熱流束と不安定流動発生領域の関係

$$Nu = 0.17 \cdot Re_b^{0.33} \cdot Pr_b^{0.43} \left[\frac{Pr_b}{Pr_w} \right]^{0.25} \left[\frac{g \cdot \beta \cdot D^3 (T_w - T_f)}{\nu^2} \right]^{0.1} \quad (3 \cdot 1)$$

ただし、添字 b は、物性値をバルク水温で、 w は加熱表面温度で評価することを示す。また、 β は水の体熱膨張率を示し、本研究では $\beta = 0.207 \times 10^{-3} [1/^\circ\text{C}]$ として計算した。

また、参考のために乱流用の熱伝達率相関式である Dittus-Boelter の式 (1930)、Deissler の式 (1955)、Petukov の式 (1970)、Gnielinski の式 (1976)、Sleicher-Rouse の式 (1975) の計算値も示した。これら、乱流用の熱伝達率相関式を適用範囲とともに以下に示す。

・ Dittus-Boelter の式 (1930) 適用範囲： $10^4 \leq Re \leq 10^5$ 、 $1 \leq Pr \leq 10$ の液体

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3 \cdot 2)$$

ただし、物性値はバルク水温での値とする。

・ Deissler の式 (1955) 適用範囲： $Pr > 0.5$

Deissler は、乱流境界層を解析的に検討している。そして、その解析結果は全体として次の近似式で表し得ることが知られている。

$$Nu = \frac{0.0396 \cdot Re^{0.75} \cdot Pr}{1 + 1.7 \cdot Pr^{-1/4} \cdot Re^{-0.125} (Pr - 1)} \quad (3 \cdot 3)$$

・ Petukov の式 (1970) 適用範囲： $10^4 < Re < 10^6$ 、 $0.5 < Pr < 2000$

Petukov は、円管内乱流の十分発達した領域におけるヌセルト数として、熱と運動量輸送のアナロジーに基づき経験式として次式を提案している。

$$Nu = \frac{(f/2) Re \cdot Pr}{1.07 + 12.7 \sqrt{f/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3 \cdot 4)$$

ここに、 f は管摩擦係数で次式で与えられる。

$$f = (3.64 \cdot \log_{10} Re - 3.28)^{-2} \quad (3 \cdot 5)$$

・ Gnielinski の式 (1976) 適用範囲： $3000 < Re < 10^6$ 、 $0.5 < Pr < 2000$

Gnielinski は、Petukov の式を修正し、低レイノルズ数領域 ($Re < 10^4$) に拡張した次式を与えている。

$$Nu = \frac{(f/2) (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \sqrt{f/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (3 \cdot 6)$$

・ Sleicher-Rouse の式 (1975) 適用範囲： $10^4 < Re < 10^6$ 、 $0.1 < Pr < 10^4$

$$Nu = 5 + 0.015 \cdot Re_f^a \cdot Pr_w^b$$

$$a = 0.88 - 0.24 / (4 + Pr_w)$$

$$b = 1 / 3 + 0.5 \exp(-0.6 \cdot Pr_w) \quad (3 \cdot 7)$$

ここで、添字 f はバルク水温 T_b と壁温 T_w から求まる膜温度 ($T_f = (T_b + T_w)/2$) での物性値を使うことを意味し、 w は壁温 T_w での物性値を使うことを意味する。

これらの式と実験結果を比較すると、実験結果は、 $Nu = 4.36$ と Collier の式の計算結果の間となり、従来の層流用の式と実験結果との差は壁温に変換して $\pm 10^\circ\text{C}$ 程度であることがわかった。また、乱流用の式の計算値が実験値より低い壁温側に、すなわち高熱伝達率側に計算されていることは、層流熱伝達が乱流熱伝達率よりも低くなるという通常口径管での傾向と同じである。図 3. 2 に D が 6 mm、 L が 360 mm で、 G が 1000 kg/m²s での実験結果と乱流用の式による計算値を比較した結果を同様に示す。図 3. 2 から既存の式と実験結果は比較的近い値となることがわかり、従来の式が、高レイノルズ数になるとそのまま小口径円管にも適用可能であることが確認された。

3. 2. 2. Dittus-Boelter 式の修正式の評価

本研究では、完全に発達した領域における小口径円管内液単相強制対流熱伝達に関して、層流と乱流を区別せず1式で液単相領域の実験結果を表現できるように Dittus-Boelter 式をもとに以下のように修正を加えた。

$$Nu_{\infty} = 0.023 \cdot Re^k \cdot Pr^{0.4}$$

$$k = 0.65 \quad : D = 2\text{mm}, 2.2\text{mm}, Re_{in} < 3000$$

$$k = 0.78 \quad : D = 2\text{mm}, 2.2\text{mm}, Re_{in} \geq 3000$$

$$D = 6\text{mm}, Re_{in} < 3000$$

$$k = 0.80 \quad : D = 6\text{mm}, Re_{in} \geq 3000$$

(3・8)

ただし、 Re_{in} は管入口での液単相レイノルズ数とする。流れが層流であろうと考えられる条件下で、式(3・8)のレイノルズ数の指数が、0.8より小さい値となることは、乱流より層流の方が熱伝達率が低いという実験結果を反映している。式(3・8)中の係数 k は連続的に変化する値と考えられるが、本研究で評価可能な実験結果の数が限られるため不連続ではあるが実験条件別に場合分けを示した。図3・1および図3・2中の太い実線は、式(3・8)による計算値である。図3・1および図3・2から熱的に発達した領域では、式(3・8)による計算値が実験値とよく一致することがわかる。

3. 2. 3. 加熱部入口からの距離が液単相強制対流熱伝達に及ぼす影響

液単相領域では図2・7および図2・14からわかるように熱的助走域で熱伝達率が高くなり、同じ熱流束でも壁温が低くなる。この熱的助走域での軸方向熱伝達率分布は、完全に発達した領域での熱伝達率の式(3・8)をもとに次式で表される。

$$Nu = Nu_{\infty} \cdot \coth\left[0.014 \cdot \left\{(z/D) + 17\right\}\right]$$

(3・9)

図3・3に D が2mm、 L が360mmで、 G が500kg/m²sでの実験結果と式(3・9)との比較結果を示す。加熱部入口端の熱伝達率は実験条件毎に違いがあるため式(3・9)の計算精度は一般に加熱部入口のごく近傍では低下するが、やや下流からは式(3・9)の計算値は良く実験値と一致するようになる。加熱部長さが短い試験部に沿

う軸方向熱伝達率分布は、加熱部長さが長い試験部の上流端近傍の熱伝達率分布と一致することが予想された。そこで、 D が2mm、 L が100mmで、 G が500kg/m²sでの実験結果と上記の式(3・9)で計算した結果とを比較した結果を図3・4に示す。図3・4から、加熱部長さが短い試験部に沿う熱伝達率分布は、加熱部長さが長い試験部の上流端近傍の熱伝達率分布と一致することが確認できた。

§ 3. 3. 核沸騰開始条件

核沸騰開始条件式として次式で表される Bergles-Rohsenow の式(1964)が、多くの解析コードで使用されている。そこで、図3・1や図3・2中に Bergles-Rohsenow の式による核沸騰開始条件をあわせて示した。

・ Bergles-Rohsenow の式(1964) 適用範囲：水の圧力1～140atmの範囲

$$q_{inc} = 15.60 \cdot P^{1.156} \left\{ T_w - T_s \right\}_{inc}^{\frac{2.30}{P^{0.1234}}} \quad (3 \cdot 10)$$

ただし、 q_{inc} [BTU/ft²h], P [psia], T [°F]である。

核沸騰は、図中の Bergles-Rohsenow の式と修正 Dittus-Boelter 式の交点で発生すると考える。 $D=2$ mmと6mmでの実験結果の内、管入口端および出口端での壁温と熱流束の関係を同じグラフ上にプロットした結果を図3・5に示す。そして、図3・5に Bergles-Rohsenow の式による計算値をあわせて示す。図3・5から全ての核沸騰が Bergles-Rohsenow の式による壁温の計算値よりも少し低い壁温で沸騰を開始していること、そして特に加熱部長さが短く高熱流束で核沸騰が開始する条件下で Bergles-Rohsenow の式の予測精度が低下することがわかった。これは、管内径が小さいほど流れが層流化し、発泡気泡の成長と離脱がより低壁温側で進行しやすいことを示している。以下の式は、小口径円管での実験結果をもとに核沸騰開始条件を調べ、まとめた式である。

$$q = 3.0 \times 10^{-4} \cdot \Delta T_{sat}^{2.6} \quad (3 \cdot 11)$$

ただし、 q [MW/m²]、 ΔT_{sat} [K]である。式 (3・11) による計算値を図3・1、図3・2、図3・3、図3・4、図3・5に示す。

§ 3. 4. 核沸騰領域の壁面熱伝達特性

3. 4. 1. 既存の熱伝達率相関式の評価

図3・6に D が6 mm、 L が360 mmで、 G が100 kg/m²sでの実験結果と既存の飽和核沸騰領域用熱伝達率式の計算値の比較結果を示す。比較した飽和核沸騰用熱伝達率式は、Dengler-Addams の式 (1956)、Shah の式 (1977)、Chen の式 (1963)、Sani の式 (1960)、均質流モデル (1991)、Jens-Lottes の式 (1951)、および Thom の式 (1966) である。これらの式を以下に示す。

・ Dengler-Addams の式 (1956) 適用範囲：水、 $P=0.06 \sim 0.28$ MPa、管内上昇流

流れが環状流状態になると、壁面に沿う液膜を通して対流熱伝達により、気液界面で蒸発する伝熱過程が現れる。この状態の熱伝達率に対しては、二相流パラメータ X_{tt} を用いた形の式が Dengler-Addams その他の研究者によって提案されている。

$$\frac{h_{TP}}{h_{L0}} = 3.5 \left(\frac{1}{X_{tt}} \right)^{0.50} \quad (3 \cdot 12)$$

ここで、 h_{L0} は全量が液相として流れたときの熱伝達率で、次式のように Dittus-Boelter の式で計算される。

$$h_{L0} = 0.023 \cdot \frac{k_f}{D} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (3 \cdot 13)$$

・ Shah の式 (1977) 適用範囲： $T_{\text{sat}} - T_f = 0 \sim 153$ K と広いサブクール度範囲

$$T_w - T_f = \frac{(\psi_0 - 1)(T_{\text{sat}} - T_f) + (q/h_{FC})}{\psi_0} \quad (3 \cdot 14)$$

ただし、 h_{FC} は Dittus-Boelter 式により算出し、 ψ_0 は次式による

$$\psi_0 = 230 \left(q \cdot G \cdot h_{fg} \right)^{0.5} \quad (3 \cdot 15)$$

・ Chen の式 (飽和沸騰用) (1963)

Chen はそれまでのデータを検討し、熱伝達率は強制対流蒸発と核沸騰の両方の影響をうけるとして、次のように両者の熱伝達率の和として表示する整理方法を提案している。

$$h_{TP} = h_{con} + h_{bo} \quad (3 \cdot 16)$$

ただし、 h_{con} は強制対流蒸発による項、 h_{bo} は核沸騰による項で、

$$h_{con} = F \times 0.023 \cdot \frac{k_f}{D} \cdot \left[\frac{G \cdot (1-x) \cdot D}{\mu_f} \right]^{0.8} \cdot Pr_f^{0.4}$$

$$h_{bo} = S \times 0.00122 \cdot \left[\frac{k_f^{0.79} \cdot Cp_f^{0.45} \cdot \rho_f^{0.49}}{\sigma^{0.5} \cdot \mu_f^{0.29} \cdot h_{fg}^{0.24} \cdot \rho_g^{0.24}} \right] \cdot (T_w - T_s)^{0.24} \cdot (P_{sw} - P)^{0.75} \quad (3 \cdot 17)$$

ここで、 F はレイノルズ数因子を表し、Chen は F をグラフ上に示している。MINI-TRAC コード(秋本 ; 1991)では、以下の式で F を近似している。ここではこの近似式を計算に用いることにする。

$$F = 1.0$$

$$F = 2.35 \cdot \left(\frac{1}{X_{tt}} + 0.213 \right)^{0.736} \quad \begin{array}{ll} \alpha < 0.05 & \text{または } x < 1.0 \times 10^{-5} \\ \alpha \geq 0.05 & \text{かつ } x \geq 1.0 \times 10^{-5} \end{array} \quad (3 \cdot 18)$$

なお、本研究では特にボイド率 α を計算せず、クオリティ x の場合分けにより F を決定した。

X_{tt} (Lockhart-Martinelli パラメータ) は、

$$\frac{1}{X_u} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad \text{ただし, } 0.01 \leq X_u \leq 10 \quad (3 \cdot 19)$$

である。また、核沸騰抑制因子 S は、 F と同様に **Chen** はグラフに示している。 F と同様に **MINI-TRAC** コード(秋本 ; 1991)では、以下の式で S を近似している。ここではこの近似式を計算に用いることにする。

$$S = \begin{cases} \left[1 + 0.12 \cdot (Re_{tp})^{1.14} \right]^{-1} & Re_{tp} < 32.5 \\ \left[1 + 0.42 \cdot (Re_{tp})^{0.78} \right]^{-1} & 32.5 \leq Re_{tp} \leq 70.0 \end{cases} \quad (3 \cdot 20)$$

ここで、

$$Re_{tp} = \left[\frac{G \cdot (1-x) \cdot D}{\mu_f} \right] \cdot 10^{-4} \cdot F^{1.25} \quad (3 \cdot 21)$$

・ Sani の式 (1960) 適用範囲 : 水、 $P=0.1 \sim 0.27\text{MPa}$ 、管内下降流

$$\frac{h_{TP}}{h_{Lz'}} = 1.48 \cdot \left(Bo \times 10^4 + 1.5 \cdot \left(\frac{1}{X_u} \right)^{2/3} \right) \quad (3 \cdot 22)$$

ただし、 $h_{Lz'}$ は次式による。

$$h_{Lz'} = 0.023 \cdot \frac{k_f}{D} \cdot \left(\frac{G \cdot (1-x) \cdot D}{\mu_f} \right)^{0.8} \cdot Pr_f^{1/3} \quad (3 \cdot 23)$$

・ 均質流モデル (Mixture model in MINI-TRAC) (1991)

二相混合強制対流領域に対する壁面熱伝達率は、次式により表される。

$$h_{f \text{ turb}} = 0.023 \cdot \frac{k_f}{D} \cdot Re_m^{0.8} \cdot Pr_f^{0.4} \quad (3 \cdot 24)$$

ただし、 Re_m 、 μ_m は次式による。

$$Re_m = \frac{G \cdot D}{\mu_m}$$

$$\mu_m = \left(\frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_f} \right)^{-1} \quad (3 \cdot 25)$$

・ Jens-Lottes の式 (1951)

$$\Delta T_s = 0.79 \cdot q^{1.4} \exp(p/6.2) \quad (3 \cdot 26)$$

ただし、 ΔT_s : K、 p : MPa、 q : W/m² である。

・ Thom の式 (1966)

$$\Delta T_s = 0.022 \cdot q^{1/2} \exp(p/8.6) \quad (3 \cdot 27)$$

ただし、 ΔT_s : K、 p : MPa、 q : W/m² である。

図3.6の実験条件は、本実験範囲内では最も既存の式の適用範囲に近い条件である。そのため既存の式による計算値と実験結果はこの条件下では良く一致する。

図3.7に D が2mm、 L が360mmで、 G が1000kg/m²sでの実験結果と既存の飽和核沸騰領域用熱伝達率式の計算値の比較結果を、図3.8に D が6mm、 L が360mmで、 G が5000kg/m²sでの実験結果と既存の飽和核沸騰領域用熱伝達率式の計算値の比較結果を同様に示す。図3.7および図3.8から、実験結果は、既存の式による壁温の計算値と比較して壁温が高めに計測されていることがわかる。本研究の図3.6を除く全ての条件で、実験値の方が計算値より壁温が高めとなる傾向が認められた。小口径円管の場合、可視化観察実験から蒸気泡は1次元的に流れることがわかっている。そのため、二相乱流混合による熱伝達率向上効果が抑制され、熱伝達率が通常口径管の場合と比較して低下することが考えられる。図3.7のように壁温測定の結果が高壁温側になるのは、そのことを示しているものと考えられる。

3. 4. 2. 小口径円管内飽和核沸騰熱伝達用相関式の評価

図3. 6、図3. 7および図3. 8の比較結果からわかるように、従来の式による計算値は、実験結果と一部の領域でしか一致しない。そこで、小口径円管内飽和核沸騰二相流での熱伝達率を概算する式を示すことにする

$$\begin{aligned} Nu &= a \cdot X + b \\ a &= 9.7 \times 10^6 D^{1.93} \\ b &= 1342 \cdot D \cdot Re_{in}^{0.44} \end{aligned} \quad (3 \cdot 28)$$

ただし、 X は局所クオリティを示し、 Re_{in} は管入口でのレイノルズ数とする。また、管内径を $D[m]$ とする。

このような式にした理由は、図2. 11や図2. 12に示されるように局所クオリティ X が正の領域で、ヌセルト数 Nu が X に対して1次関数的に増加する傾向を示すことによる。なお、式中の係数 a 及び b は無次元数であることが望まれたが、データが不十分であるため現時点では $D[m]$ を含む形で示した。

式(3. 28)による計算値を図3. 1、図3. 2、図3. 3、図3. 4に太線で示す。

式(3. 28)と実験結果を比較すると、 L が360mmの場合 $\pm 10^\circ\text{C}$ 以内の予測精度で壁温を計算できる。しかし、 L が100mmと短い場合には予測精度は $\pm 20^\circ\text{C}$ 程度に低下する。

§ 3. 5. 小口径円管での興味深い壁温変動

小口径円管内での沸騰二相流実験では、加熱部長さが長い場合と極端に短い場合に興味深い壁温変動が発生することがあった。この現象は、それぞれ(A)小口径で加熱部が長い場合、遷移沸騰領域で沸騰曲線が正の勾配となり、比較的安定したポストDNBが発生する、(B)加熱部長さが極めて短い場合、バーンアウト直前で壁温が50秒以上の長い時間幅で振動する、というものである。

通常口径管では一般にDNBは極めて高速度で進行する。しかし上記(A)の場合、図3. 9に示すように低出口クオリティの状況からヒートアップが準定常的に生じる特性があり興味深い。これは、流路が長くかつ狭いために流れが1次元的となり、低クオリティで逆

環状流的な流れに変わり、ポストDNBに遷移している現象であると考えられる

一方上記(B)の場合、図3. 10に示すようなゆるやかな大きなピークを描く壁温振動が不規則に発生することがあった。この現象は、加熱部長さが極端に短くかつ高い熱流束条件で顕著となっていた。本現象の解明のため簡単な解析を試みたが、変動の時間幅が50秒を超える原因に関して十分な説明ができるまでには至らなかった。

§ 3. 6. 結言

小口径円管内での強制流動沸騰二相流実験を実施し得られた結果と既存の相関式と比較し、適用の可能性について検討した。そして、以下の結論を得た

- (1) 既存の壁面熱伝達率相関式による計算値と実験結果を比較した結果、液単相強制対流熱伝達に対する既存の式は、実験結果と比較的良く一致した。本章では、完全に発達した領域における小口径円管内液単相流動熱伝達に関して、層流と乱流を区別せず1式で液単相領域の実験結果を表現できるようにDittus-Boelter式の修正式を示し、軸方向熱伝達率分布を補正する式もあわせて示した。これらの式により、加熱部長さが短い小口径円管内での液単相熱伝達も計算できることを示した。
- (2) 核沸騰開始条件式であるBergles-Rohsenowの式は、やや高めに壁温を計算する傾向があった。そこで、実験結果をもとに小口径円管内強制流動用の核沸騰開始条件式を示した。
- (3) 飽和核沸騰熱伝達に関する既存の相関式を小口径円管に用いた場合、壁温を低めに計算する傾向があり、特に小口径で高質量速度の場合に予測精度が低下することがわかった。そこで、本実験範囲内の実験結果と比較的良く一致する熱伝達率相関式を示した。
- (4) 小口径円管内での沸騰二相流実験では、加熱部長さが長い場合と極端に短い場合に興味深い壁温変動が発生することがあった。本章では、小口径円管でかつ比較的長い加熱部の場合に観察されるポストDNB現象と極端に短い場合に観察される緩やかな大きなカーブを描く壁温振動の2種類の現象を示した。

小口径円管内強制流動時の熱伝達率予測式を、本章で得られた結論をもとに整理した。これを図3. 11に示す。

小口径円管内強制流動時の熱伝達に関する今後の課題として、サブクール核沸騰区間での最適熱伝達率予測式の提案があげられる。そのためには、より詳細なデータを幅広く蓄積し評価する必要がある。

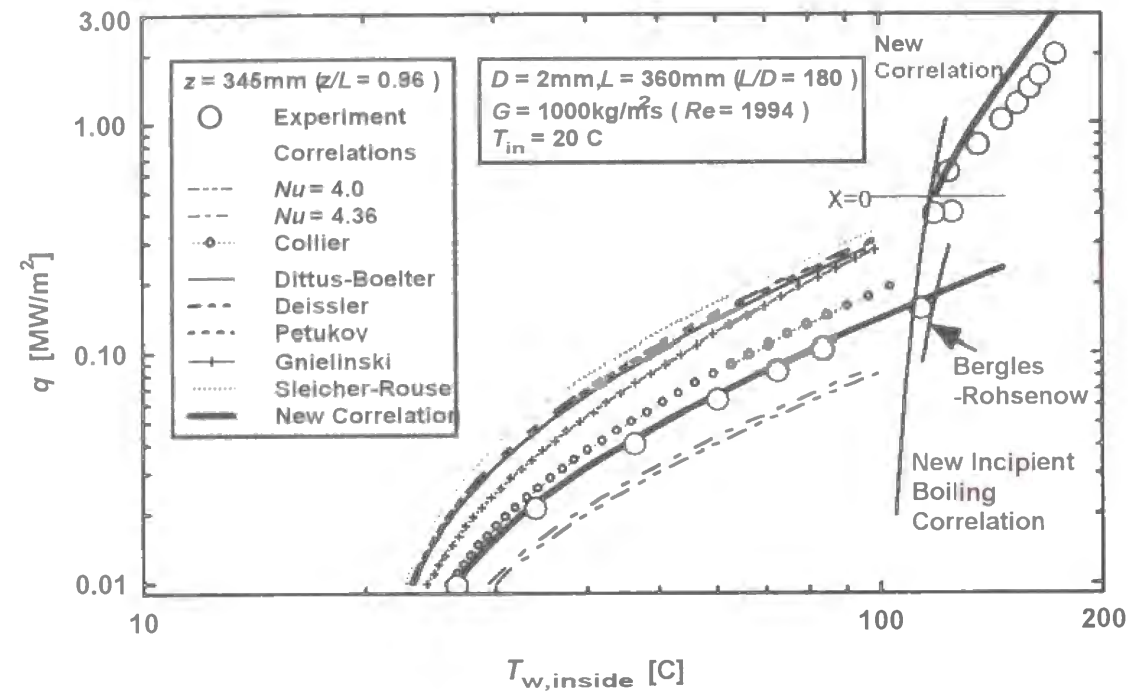


図3.1 実験結果と既存の相関式および新相関式との比較結果
($D=2\text{mm}$ 、 $G=1000\text{ kg/m}^2\text{s}$ 、出口近傍)

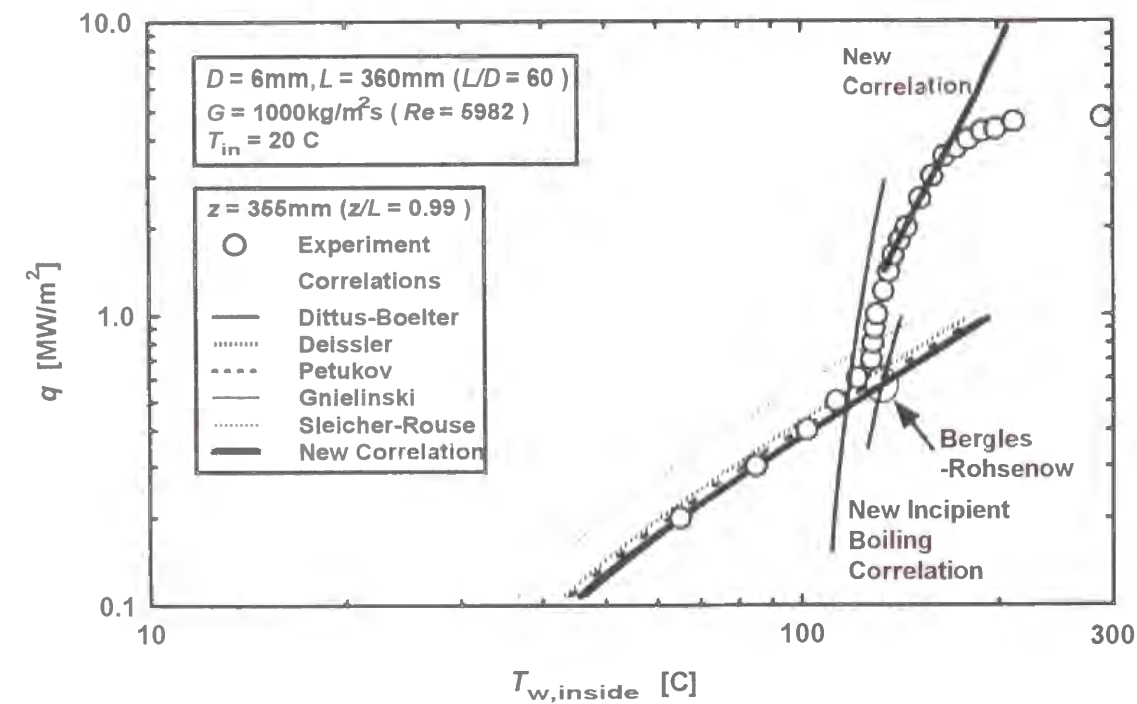


図3.2 実験結果と既存の相関式および新相関式との比較結果
($D=6\text{mm}$ 、 $G=1000\text{ kg/m}^2\text{s}$ 、出口近傍)

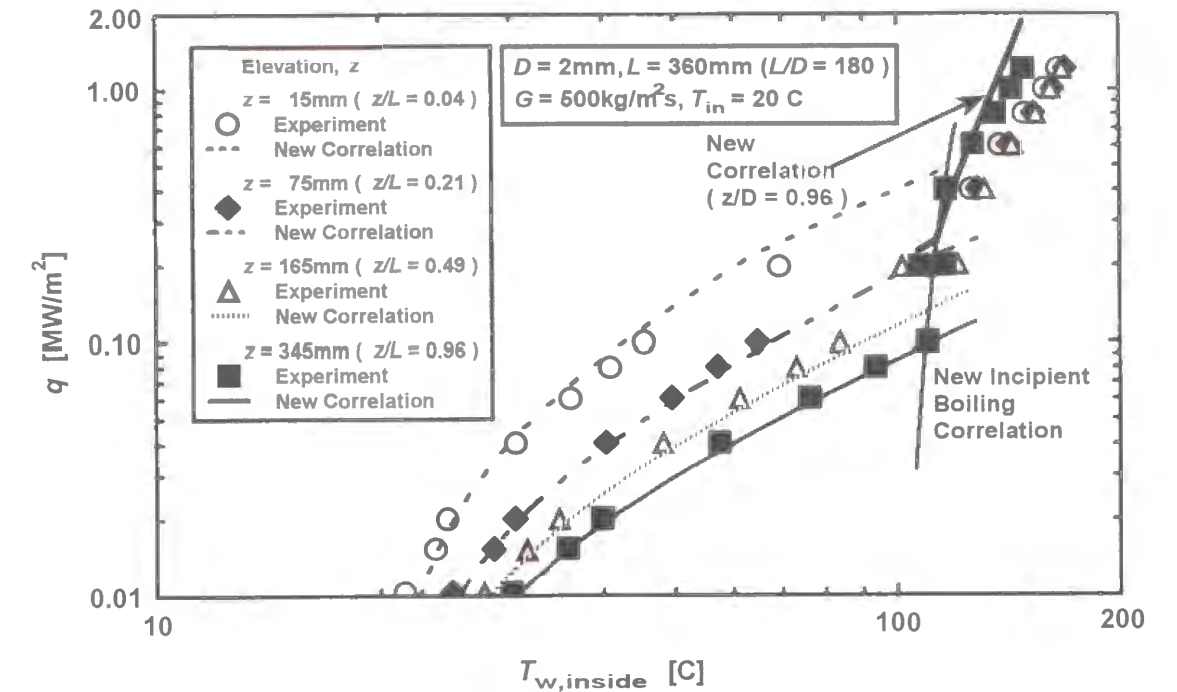


図3.3 実験結果と軸方向熱伝達率分布の補正式および新相関式との比較結果

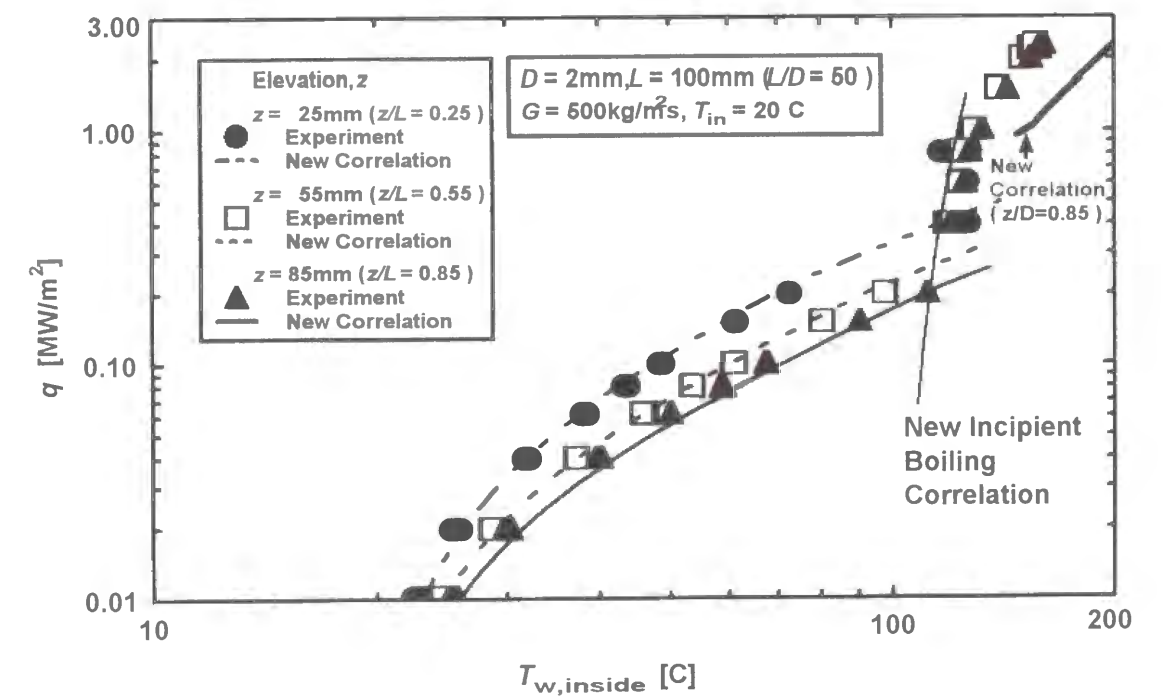


図3.4 加熱部長さが短い円管の実験結果と軸方向熱伝達率分布の補正式および新相関式との比較結果

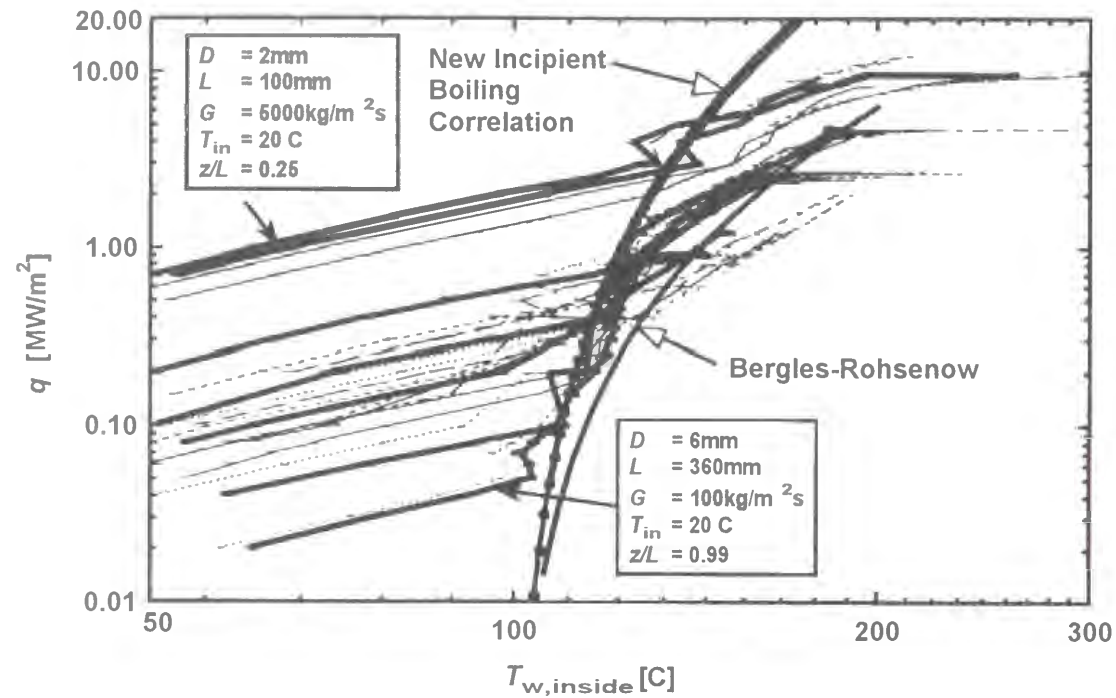
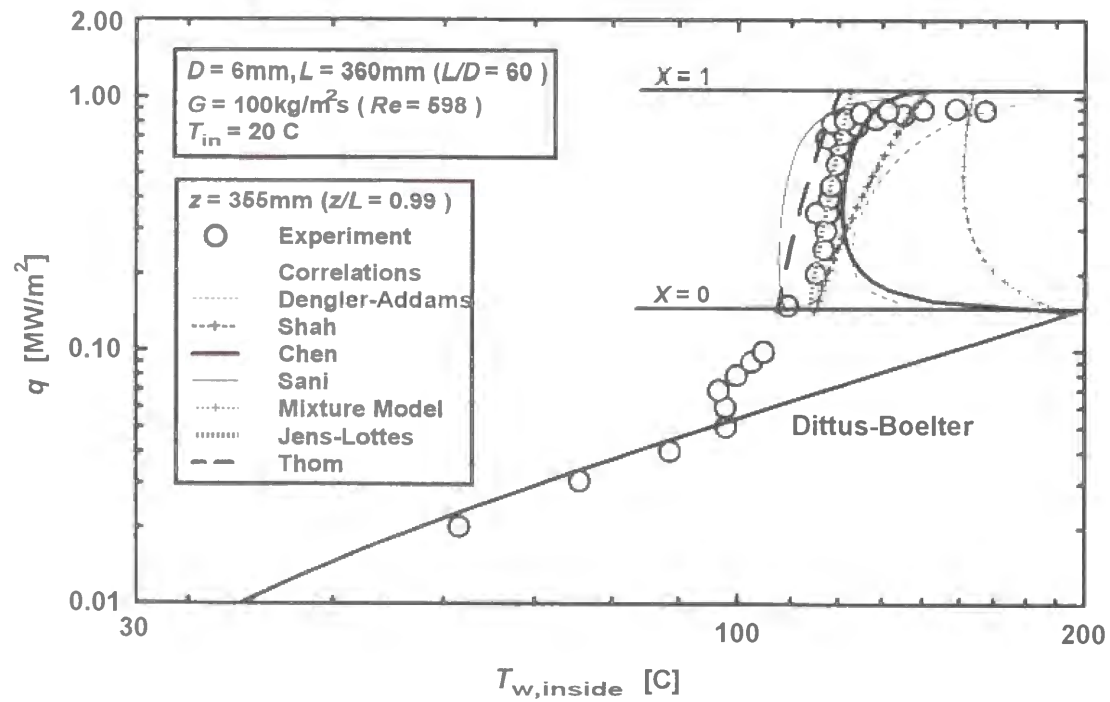
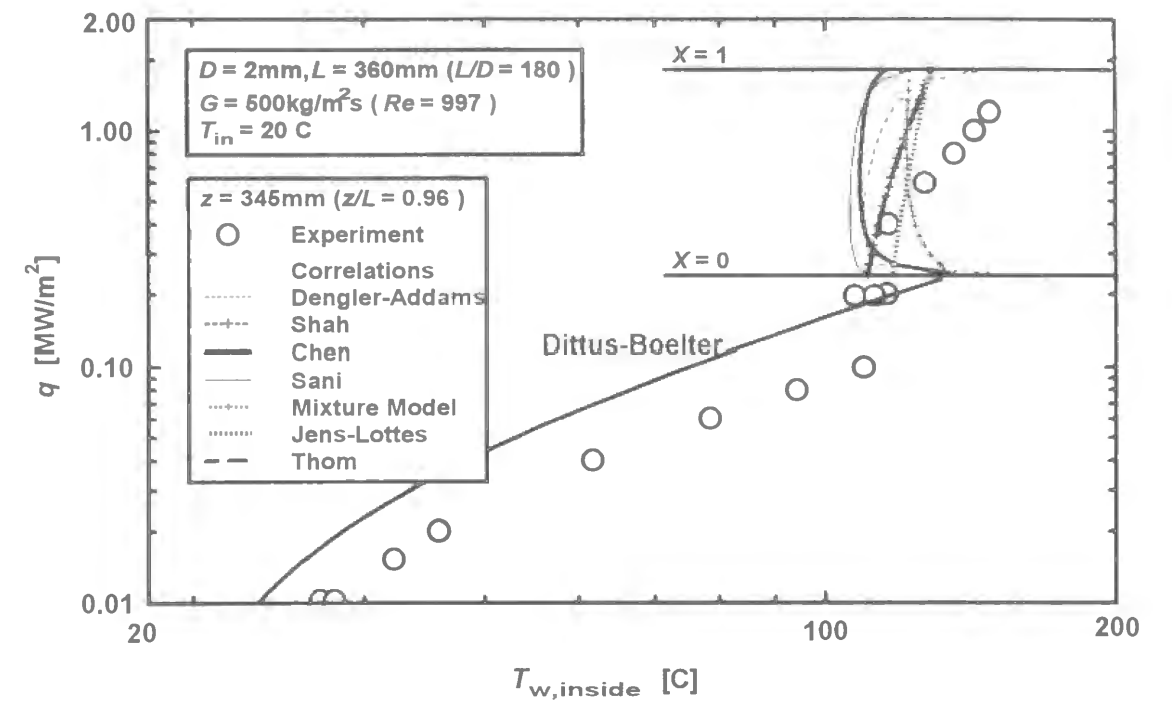
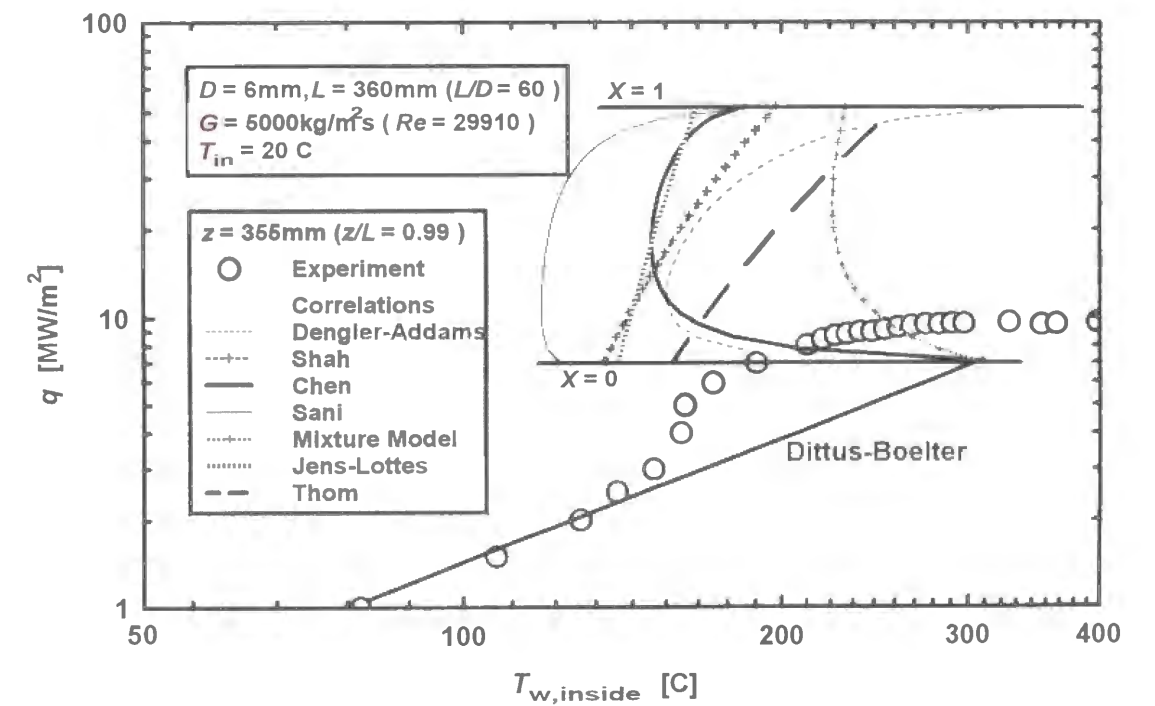


図3.5 実験結果と核沸騰開始条件相関式との比較結果

図3.6 実験結果と既存の飽和核沸騰領域用相関式との比較結果
($D=6\text{ mm}$ 、 $G=100\text{ kg/m}^2\text{ s}$ 、出口近傍)図3.7 実験結果と既存の飽和核沸騰領域用相関式との比較結果
($D=2\text{ mm}$ 、 $G=1000\text{ kg/m}^2\text{ s}$ 、出口近傍)図3.8 実験結果と既存の飽和核沸騰領域用相関式との比較結果
($D=6\text{ mm}$ 、 $G=5000\text{ kg/m}^2\text{ s}$ 、出口近傍)

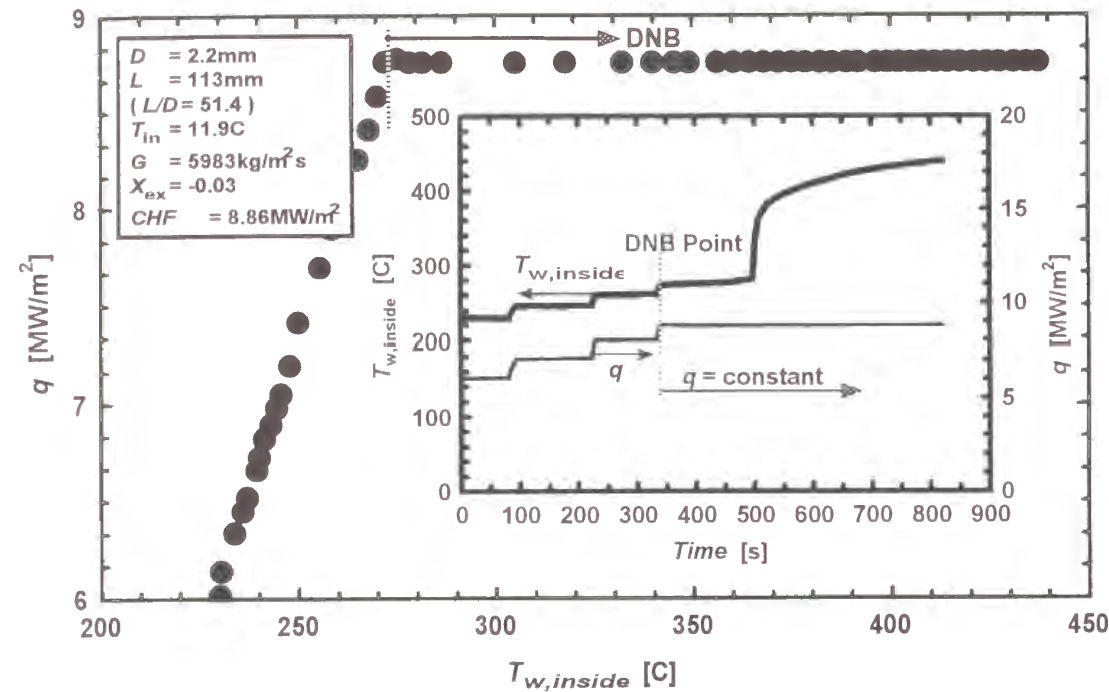


図3. 9 小口径で加熱部長さが比較的に長い場合でのポストDNB現象

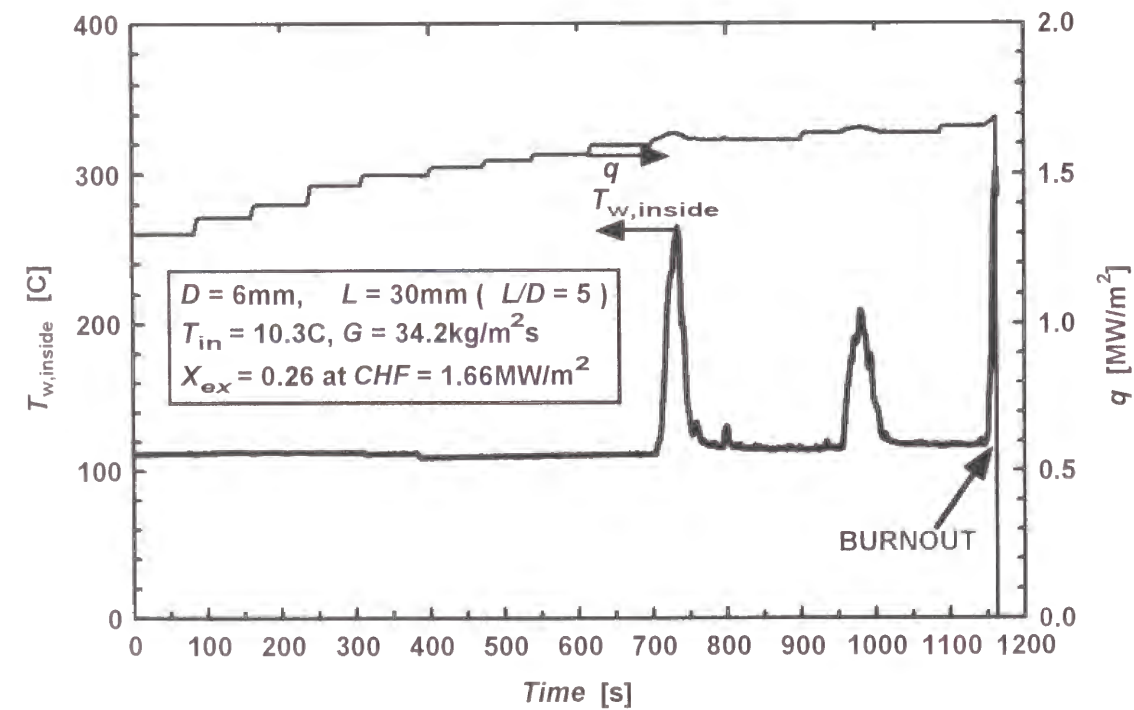


図3. 10 加熱部長さが極めて短い場合での壁温振動の例

Heat Transfer in Small-Diameter Tubes

Single-phase convection

$$Nu = Nu_{\infty} \cdot \coth[0.014 \cdot \{(z/D) + 17\}]$$

$$Nu_{\infty} = 0.023 \cdot Re^k \cdot Pr^{0.4}$$

$$k=0.65 : D=2\text{mm}, 2.2\text{mm}, Re_{in} < 3000$$

$$k=0.78 : D=2\text{mm}, 2.2\text{mm}, Re_{in} \geq 3000$$

$$D=6\text{mm}, Re_{in} < 3000$$

$$k=0.80 : D=6\text{mm}, Re_{in} \geq 3000$$

Onset of nucleate boiling

$$q = 3.0 \times 10^{-4} \cdot \Delta T_{sat}^{2.6}$$

$$q[\text{MW/m}^2], \Delta T_{sat}[\text{K}]$$

Saturated nucleate boiling

$$Nu = a \cdot X + b$$

$$a = 9.7 \times 10^{-6} \cdot D^{1.93}$$

$$b = 1342 \cdot D \cdot Re_{in}^{0.44}$$

$$D[\text{m}]$$

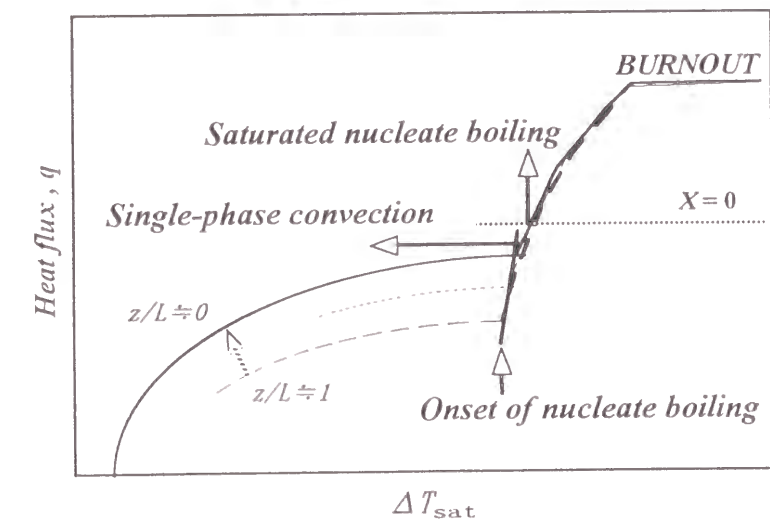


図3. 11 小口径円管内強制流動時の熱伝達率予測式

第4章 小口径円管内強制流動沸騰バーンアウト

§ 4. 1. 緒言

円管内強制流動沸騰バーンアウトの研究は、原子炉の熱水力設計や安全評価をはじめ伝熱機器の熱工学的上限と関連してきわめて重要な研究であり、古くから研究がなされている。そして、バーンアウトに関する報告は、始めは有次元相関式の提案がなされ、次に式の無次元整理がなされ、近年ではいくつかの機構論的モデルや数値解析モデルが提案されてきた。そして、これらの相関式やモデルは、原子炉をはじめとする伝熱機器の熱工学設計や安全評価に広く用いられてきた。しかし、高熱流束負荷機器で重要となる小口径円管内強制流動沸騰バーンアウトを対象に提案されている相関式は少なく、適用範囲外では限界熱流束の予測精度が低下するものと考えられる。また、現在小口径円管までカバーした機構論的モデルはなく、従来の機構論的モデルを構成している実験相関式のほとんどの適用範囲が加圧水型軽水炉の運転条件内であるため、小口径円管内強制流動沸騰バーンアウトの最適予測は従来のモデルでは困難と考えられる。

通常口径円管のバーンアウトの発生機構に関して、サブクール領域用に提案されている Katto (1989, 1990, 1992)、Celata ら (1994) による薄液膜ドライアウトモデル、気泡充満モデル (Weisman ; 1983, 1988)、等バーンアウトモデルが幾種類か提案されている。しかし、流路がきわめて狭い小口径円管内では、表面張力の流動様式におよぼす影響が大きく、流動様式が特殊となることが第2章の可視化観察実験からわかっており、バーンアウト発生機構が通常口径管と異なることも考えられる。

そこで本章では、まず小口径円管内強制流動時のバーンアウト発生機構を、バーンアウト直前での加熱部壁面温度の変動特性と可視化観察結果をもとに分類し、バーンアウトのタイプ別にバーンアウトのトリガーメカニズムを考察した。そして、高圧条件や通常口径円管用に提案された限界熱流束相関式や機構論的モデル、または解析モデルと実験結果を比較し、低圧下の小口径円管への適用の可能性を評価した。

§ 4. 2. バーンアウトの発生機構別分類

加熱部外壁面温度の変動特性と可視化観察結果を比較しながら整理すると、バーンアウト直前での壁温の変動特性と可視化観察結果がおおよそ対応することがわかった。そこで、壁温変動と観察結果に基づき、バーンアウトの発生機構を以下のように3種類に大別する

ことにした。

(A) フラッディング型のバーンアウト

(B) ドライアウト型のバーンアウト

(C) DNB型のバーンアウト

これらは、それぞれ以下のような特徴がある。

(A) フラッディング型のバーンアウト発生時の可視化観察例と壁面温度変動の一例を図

4. 1 の上に示す。観察結果から以下のことが確認された

(1) 上端から重力により液膜の流下がある

(2) ドライパッチが加熱部中央付近で発生する

(3) ドライパッチの上下には、薄液膜が形成されている。

また、壁面温度変動の特徴として以下のような点がある。

(1) 限界熱流束以下では、壁面温度の振動幅は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以下と振動幅は小さい。

(2) 一旦加熱部中央部で壁面温度の上昇が始まると、比較的ゆっくりと上下方向に広がりながら壁温が上昇する。

(B) ドライアウト型のバーンアウトのバーンアウト発生時の可視化観察例と壁面温度変動の一例を図4. 1 の中央に示す。観察結果から以下のことがわかった。

(1) 限界熱流束近傍では、加熱部出口端でドライパッチの発生とリウエットが周期的に繰り返される。

(2) 限界熱流束時には、出口でドライパッチが定常的に発生し、リウエットされず出口端でバーンアウトする。

また、壁面温度変動の測定結果から、以下のことがわかった。

(1) 図中の例のように出口近傍の壁面温度が振動する、いわゆる沸騰遷移 (Boiling Transition) が限界熱流束近傍で生じる。

(2) 出口水温は常に飽和しており、バーンアウトは常に出口端で生じる。

(C) DNB型のバーンアウトのバーンアウト発生時の可視化観察例と壁面温度変動の一例を図4. 1 の下に示す。観察結果からわかったことを以下に記す。

(1) 加熱壁面上に微小なサブクール気泡が発生し、その充満密度は出口に近づくほど高まる。ただし、充満密度が低くてもバーンアウトに至る場合が多く観察された。

(2) 気泡速度は出口に近づくほど高速となり、一旦壁面から離脱した気泡はある程度の

大きさまで合体しながら速度を増してゆく。

- (3) バーンアウトは極めて高速（1000フレーム／秒の高速ビデオによる観察でも捕らえられない。）に進行し、破断位置は、必ずしも出口端とは限らない。

また、壁面温度変動の測定結果から、以下のことがわかった。

- (1) 限界熱流束近傍までは、壁面温度の振動幅は $\pm 1^\circ\text{C}$ 以下と小さく沸騰遷移は観察されない。
- (2) 限界熱流束で急激に、またスポット的に壁温が上昇する。バーンアウトは図のように上流側で発生することもあるが、フラッディング型とは局所的に溶解する点や壁面過熱度がきわめて高い点が異なる

これらのタイプはなだらかに連続している。そして本実験範囲内では、極端に小口径であつたり、加熱部が短い場合に特殊なタイプが観察されることも多くあった。そこで、管内径、 L/D 、入口サブクール度、そして質量速度とバーンアウトタイプの関係を詳細に調べてみた。以下に、壁面温度変動を調べてわかったことを記す。

- (1) 管内径が2 mm以下、 L/D が50以下では、沸騰遷移は観察されず、全領域でDNB型となる。
- (2) 管内径が4 mmの場合、後述する特殊な領域以外は、出口クオリティが約0.5以上でドライアウト型となり、約0.5以下でDNB型となる。ただし、ドライアウト型でも沸騰遷移時の壁温振幅は小さい。
- (3) 管内径が6 mmの場合、後述する特殊な領域以外は、出口クオリティが約0.25以上でドライアウト型となり、約0.25以下でDNB型となる。そして、ドライアウト型の場合には、沸騰遷移による壁面温度の振動が顕著に生じる。
- (4) 小口径で加熱部長さが長い場合の特殊性が、管内径が1 mm、 L/D が100の試験部の場合に観察された。これは、管出口端の壁面温度が5秒程度の緩やかな上昇率で上昇するもので、このときの加熱熱流束も自発的に上昇するため、いわゆる沸騰曲線の遷移領域が正の勾配を持つようなカーブとなる。
- (5) 加熱部長さが短い場合の特殊性が、管内径が4 mmや6 mmで、 L/D が10以下、そして、入口サブクール度が小さく、出口クオリティが正となる領域で観察された。

図4.2に壁面温度変動の特性と観察結果をもとに、バーンアウトのタイプ分けを行った結果を示す。また、図4.3に図4.2の結果を出口クオリティの関数としてプロットし、同様にタイプ分けを行った結果を示す。図4.2および図4.3の結果から、 L/D

が5と極端に小さい場合には、正の比較的低い出口クオリティでバーンアウトデータがばらついている。この領域の壁面温度変動の観察から、データがばらつく領域では、ドライアウト型とDNB型が競合していることがわかった。また、この領域の可視化観察結果(図2.18参照)から、加熱管内では、不定形の大きな液塊と小さな液滴が振動しながら飛び交う様子が観察された。そして、この特殊領域より高い熱流束では、DNB型となり、この特殊領域より高い出口クオリティとなる場合には、ドライアウト型となっている。

§ 4. 3. バーンアウト発生機構別バーンアウト・発生メカニズムの考察

(1)フラッディング型のバーンアウト

図4.1の上の写真からわかるように、バーンアウトは、下から流入する液により形成される薄液膜と上方から流下してくる薄液膜が加熱部中央付近で蒸発し、定常的なドライパッチを形成することにより生じる。すなわち、下から流入する液流量が0の時、限界熱流束値は最低となり下端近傍でバーンアウトする。そして、液流量が増すほど、バーンアウト位置、すなわちドライパッチ発生位置は上方に移動し限界熱流束値は上昇する。出口クオリティが1以上と計算される領域でのバーンアウトは、すべてこのフラッディング型である。

(2)ドライアウト型のバーンアウト

図4.2の中央左の写真のように、バーンアウトは、出口端で液膜が蒸発し、定常的なドライパッチが形成されることにより生じる。そのため出口クオリティが0以上の高い領域に限られる。管内径が4 mm以上で低流量の場合、ボイリング・トランジションが観察されることから、出口近傍でドライパッチの生成とリウエットが繰り返され、リウエットできなくなる熱流束がバーンアウトを決定すると考えられる。また中間クオリティ($X_{e,x}$ が0.1~0.8)でバーンアウトする場合で、出口で比較的低い速度(バーンアウトまで数秒間)で温度の上昇があればボイリング・トランジションが観察されなくてもドライアウト型に分類した。中間クオリティ領域では、図4.2の写真のように、不定形の液塊や液滴が発生と、デポジットを繰り返していたり、図2.17のように小口径円管特有の竹の節状の気泡スラグが周期的に高速で通過する流れとなっている。そのため、管内径が小さくなった場合や、 L/D が小さい場合、そして質量速度が大きい場合には、DNB型と競合する領域もある。

(3)DNB型のバーンアウト

写真観察から、加熱管内壁面上に微小なサブクール気泡が出口近傍で高速に移動する様子が観察された。気泡の充満密度は、条件により全く様子が異なっている。特に気泡が離脱するまでと後とでは、全く様子が異なっている。DNB型は管内径が2 mm以下の小口径円管や出口クオリティが0.5以下でのバーンアウトで観察されるが、観察から以下のようなタイプにおおよそ分類できた。

- (3.1) すぐにお互いの気泡群が集合し、大きめの気泡となり離脱し、合体成長する「低流量・小口径型」
- (3.2) 気泡群が疎密な状態となり、管中央には常に液が流れている「高流量・小口径型」
- (3.3) 気泡がほぼ均等に分散し充満密度は粗で、出口近傍では微小気泡が高速に流れている「高流量型」に分類できる。

その他の場合は、これらの混在するタイプであったり、チャーン流に近い乱れた流れであったりと分類が困難なタイプもあった。

観察から、DNB型のバーンアウトのトリガーメカニズムは、上記のそれぞれのタイプ別に次のように考えられる。

- (3.1) 「低流量・小口径型」の場合には、気泡の合体による成長と上昇中に、スラグ状の合体気泡と加熱壁面との間の薄液膜が消滅することによりバーンアウトに至る。
- (3.2) 「高流量・小口径型」の場合には、気泡群（小気泡が集まり気泡が密となっている部分）下の加熱壁面近傍では、気泡密度が低い領域よりも壁面近傍の液流速が低下していることが考えられ、そのため熱伝達率の低い特異点となる。この条件下では、バーンアウトが出口端ではなく上流側で発生することがある(図4.1の下参照)が、これは気泡群下の加熱壁近傍の液膜がスポット的にドライアウトし、液流速の局所的な低下のため微少なドライパッチが形成され、上流バーンアウトが発生しやすいものと考えられる。
- (3.3) 「高流量型」の場合には、気泡の大きさは1 mm以下であり、ほぼ均等に分散し、気泡充満密度は出口端でも高くない。条件によっては、筋状の微小気泡の列が形成され、壁面近傍を高速に微小気泡が流れている。1000フレーム／秒の高速ビデオによる観察でも、壁面近傍は高速な微小気泡の流れのため雲がかかったような状態で詳細な観察は困難であった。バーンアウトが上流側で

点状に発生することや、バーンアウト時の壁面温度上昇が極めて高速であることから、微小気泡の移動中に気泡下の薄液膜が消滅し、スポット的に壁温の急上昇に至るものと考えられる。

§ 4. 4. 既存の限界熱流束相関式およびモデル式の適用性の評価

現在までに、通常口径円管用、高圧条件下用に多くの限界熱流束相関式が提案され、近年は機構論的モデルや数値解析モデルも提案されている。これらの相関式やモデルの中から、本研究範囲に比較的近い適用範囲を持ち、またモデルに関しては可視化観察結果と近い仮定がなされていると思われるモデルを選び、本研究範囲への適用の可能性を評価した。以下にタイプ別に既存の相関式やモデル式を示し、それらの式による予測値と実験値を比較した結果を示す。

4. 4. 1. ドライアウト型バーンアウト領域

(1)実験相関式の適用性の評価

ドライアウト型バーンアウト領域用の相関式として、Macbeth の式 (Tompson ; 1964) 、Lowdermilk の式 (1958) がある。また、Katto (1992) はドライアウト型からDNB型までの広範囲にわたり適用できる限界熱流束相関式を提案している。これらの適用範囲と式、そして実験データとの比較結果をそれぞれ記す。

(1. 1) Macbeth ら (Tompson ; 1964) による相関式

表 4. 1 Macbeth の式の適用範囲

<i>D</i> [mm]	<i>L</i> [mm]	<i>G</i> [kg/m ² s]	<i>P</i> [MPa]	CHF [MW/m ²]
1 - 37.5	25.4 - 3099	< 18,600	1.7 - 20.4	< 31

(1. 1. 1) 高流速領域

$$q \times 10^{-6} = \frac{A + \frac{1}{4} C \cdot D \left(G \times 10^{-6} \right) \Delta h_f}{1 + C \cdot L}$$

$$A = 1.12 D^{-0.211} (G \times 10^{-6})^{0.324}$$

$$C = 0.0010 D^{-1.4} (G \times 10^{-6})^{-1.05}$$
(4・1)

(1. 1. 2) 低流速領域

$$q \times 10^{-6} = \frac{(G \times 10^{-6})(h_{fg} + \Delta h_i)}{158 D^{0.1} (G \times 10^{-6})^{0.49} + 4 \frac{L}{D}}$$
(4・2)

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

q	:	限界熱流束	BTU/hft ²
G	:	質量速度	lb/hft ²
h_{fg}	:	蒸発潜熱	BTU/lb
Δh_i	:	入口エンタルピー	BTU/lb
L	:	加熱部長さ	ft
D	:	管内径	ft

図4・4の(1)に Macbeth の式と出口で正のクオリティとなる領域でバーンアウトした実験データ(以下、正クオリティの実験データと呼ぶ。)を比較した結果を示す。

また、図4・5の(1)、(2)に他の相関式と共に、実験データと比較した結果の一例を示す。Macbeth の式は、低流量・高クオリティで、実験データと良く一致するが、 L/D が小さい場合に中間クオリティ領域で50%程度高く計算される傾向があることがわかった。

(1. 2) Katto ら (1992) による相関式

入口サブクールエンタルピー ΔH_i 、蒸発潜熱 H_{fg} 、限界熱流束 q_c に対して、

$$q_c = q_{c0} [1 + K(\Delta H_i / H_{fg})]$$
(4・3)

と書き、ここに定義される2物理量、すなわち基礎限界熱流束 q_{c0} 、および入口サブクールパラメータ K を無次元表示するもので、まず q_{c0} は、与えられた条件に応じ下記の4式から決定される。

$$\frac{q_{c0}}{G \cdot H_{fg}} = C \left(\frac{\sigma \cdot \rho_l}{G^2 \cdot L} \right)^{0.043} \frac{1}{L/D}$$
(4・4)

$$\frac{q_{c0}}{G \cdot H_{fg}} = 0.10 \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.133} \left(\frac{\sigma \cdot \rho_l}{G^2 \cdot L} \right)^{1.3} \frac{1}{1 + 0.0031(L/D)}$$
(4・5)

$$\frac{q_{c0}}{G \cdot H_{fg}} = 0.098 \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.133} \left(\frac{\sigma \cdot \rho_l}{G^2 \cdot L} \right)^{0.433} \frac{(L/D)^{0.27}}{1 + 0.0031(L/D)}$$
(4・6)

$$\frac{q_{c0}}{G \cdot H_{fg}} = 0.0384 \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.60} \left(\frac{\sigma \cdot \rho_l}{G^2 \cdot L} \right)^{0.173} \frac{1}{1 + 0.280(\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{0.233} (L/D)}$$
(4・7)

そして、式(4・4)右辺のパラメータ C の値は、 $L/D < 50$ に対し $C = 0.25$ 、 $L/D = 50 - 150$ に対し $C = 0.25 + 0.0009([L/D] - 50)$ 、 $L/D > 150$ に対し $C = 0.34$ である。

次に K については、式(4・4)～(4・7)にそれぞれ対応して下記のごとく与えられている。

$$K = \frac{1.043}{4 C (\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{0.043}}$$
(4・8)

$$K = \frac{5}{6} \frac{0.0124 + D/L}{(\rho_v / \rho_l)^{0.133} (\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{1/3}}$$
(4・9)

$$K = 0.416 \frac{(0.0221 + D/L)(D/L)^{0.27}}{(\rho_v / \rho_l)^{0.133} (\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{0.433}}$$
(4・10)

$$K = 1.12 \frac{1.52 (\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{0.233} + D/L}{(\rho_v / \rho_l)^{0.60} (\sigma \cdot \rho_l / G^2 \cdot L)^{0.173}}$$
(4・11)

なお、Katto の相関式の適用範囲は、特に表記されていないが現在、強制流動沸騰系では最も適用範囲の広い相関式と思われる。

上記の Katto らによる相関式と本研究で得られた正クオリティの実験データを比較した結果を図 4. 4 の (2) に示す。

図 4. 4 の (2) から、1 MW/m²以上で Katto の式は実験データと比較して高い値に計算される傾向があることがわかった。

この予測精度の低下は、図 4. 5 の (1) 図のように、 L/D が極めて小さい場合や、管内径が 4 mm 以下と小さい場合に顕著であった。

(1. 3) Lowdermilk ら (1958) による相関式

表 4. 2 Lowdermilk の式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	u_{in} [m/s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
1.3 - 4.8	65 - 990.6	0.03 - 29.9	0.1 - 0.69	0.17 - 41.6

(1. 3. 1) 高クオリティ領域 ($G/(L/D)^2$ が 150 以下である場合)

$$\left(\frac{Q}{S}\right) D^{0.2} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{0.85} = 270 G^{0.85} \quad (4 \cdot 12)$$

(1. 3. 2) 低クオリティ領域 ($G/(L/D)^2$ が 150 以上である場合)

$$\left(\frac{Q}{S}\right) D^{0.2} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{0.15} = 1400 G^{0.5} \quad (4 \cdot 13)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

Q/S :	限界熱流束	BTU/hft ²
G :	質量速度	lb/hft ²
L :	加熱部長さ	ft
D :	管内径	ft

図 4. 4 の (3) に Lowdermilk の式と正クオリティの実験データを比較した結果を示す。

Lowdermilk の式は、管内径が 4 mm 以上、 L/D が 25 以上では、図 4. 5 の (2) のように、本実験データと極めて良く一致していた。しかし、式の範囲外である。 L/D が 10 以下のデータに関しては、図 4. 5 の (1) のように、予測精度は低下することが確認された。

以上のように、ドライアウト用相関式と実験結果を比較した結果、管内径が 2 mm 以上、 L/D が 25 以上では、Lowdermilk の式により実験データを精度良く予測できることが分かった。しかしながら、管内径が 1 mm 以下で、 L/D が 10 以下では、どの相関式も予測精度が低下し、適切な予測式がないことが比較結果から分かった。

(2) 三流体モデルに基づく数値解析コードの適用性の評価

Sugawara ら(1990)は、沸騰水冷却型原子炉の炉心内の熱流動解析を対象として、二相流を液膜、液滴および蒸気の三流体としてそれぞれに保存則を適用したサブチャンネル解析コード FIDAS を開発している。しかし、FIDAS コードはもともと沸騰水型軽水炉のような高圧力条件下の水が炉心チャンネル間を流れる沸騰流動用に開発されたものであり、検証されている管内径は 10 mm 程度である。また構成式には管内径が 10 mm から 20 mm の高圧下で測定されたデータをもととした式が多く含まれているが、小口径円管内大気圧水条件下での構成式の適用性については検証がなされていない。そこで、ここでは本研究で得られた小口径円管内大気圧水限界熱流束データを用いて、FIDAS コードに組み込まれている三流体モデルの構成方程式の、本体系の限界熱流束予測における妥当性を調べ、適用上の問題点について検討した。

解析の条件を表 4. 3 に示す。解析においては、加熱部出口で環状液膜がドライアウトするような熱流束を求め、これを限界熱流束として求めている。

表 4. 3 FIDAS コードによる解析条件

D [mm]	L/D [-]	T_{in} [°C]	G [kg/m ² s]
6	25, 50, 113	10, 30	10 - 2,000

解析結果

図 4. 5 の (2) に、管内径が 6 mm で、 L/D が 50 での FIDAS コードによる解析結果と実験結果の比較を他の相関式と共に示す。また、 L/D が 25、113 の場合での比

較結果を図4.6の(1)および(2)に示す。これらの比較結果から、 L/D が50の場合は実験データと良く一致しているが、 L/D が113の場合はやや高めに、 L/D が25の場合には低めに計算されることがわかった。また、図4.7の(1)および(2)に管内径が6mmで、 L/D が113、入口水温が30℃、質量速度が400kg/m²s、そして入口圧力を0.29MPaとした場合のFIDASコードによる解析結果を示す。ただし、これらの計算は、液滴初速度を液膜速度に等しいと仮定した場合での結果を示している。

適用性の評価

FIDASコードによる小口径円管内大気圧水の限界熱流束の予測を行い、実験結果と比較した。これにより、大気圧近傍においても、 L/D が50以上の小口径円管でドライアウト型バーンアウトである場合には、同コードに組み込まれている三流体モデルが適用可能であることがわかった。本体系へのFIDASコードの適用上の問題点を以下に示す。

- (1) 質量速度が500kg/m²s以上の計算で、計算が収束するまでに加熱部出口付近での圧力が一時的に大気圧以下となり、数値不安定が発生することがある。これは、計算実行時の蒸気表の制限のためであり、計算を安定に実行させるためには高流量では加熱部出口における圧力を大気圧より高くなるように入口圧力を設定せざるを得ない場合がある。図4.6(2)の高流量域($G > 500$ kg/m²s)での計算結果は、これが原因で実験結果より高くなっている可能性がある。
- (2) また、高質量速度において限界熱流束を過大評価する原因として、(1)の理由の他、蒸気流速が大きいとき液滴割合を過小評価している可能性もある。
- (3) 図4.6(1)の比較からわかるように、 L/D が小さくなるほど限界熱流束の予測値は実験値より低く計算される傾向がある。今後は、液滴割合に対する L/D の効果を詳細に調べる必要がある。
- (4) 図4.7(2)の蒸気流速の解析結果のように、質量速度が大きいとき、限界熱流束近傍では蒸気流速が300m/sを超え音速に近くなるので、臨界流も考慮する必要があるかもしれない。
- (5) 質量速度が非常に低いとき($G < 20$ kg/m²s)、エラーが発生し、計算が収束しない。
- (6) 液滴初速度を蒸気速度に等しいとした場合には、液滴発生点でステップ状の変化が現れ、計算がやや不安定になる。限界熱流束は、液滴初速度を液膜速度に等しいとした場合より低くなる傾向がみられた。

4.4.2. DNB型バーンアウト領域

(1) 実験相関式の適用性の評価

DNB型バーンアウト領域用の相関式である、Knoebelの式(1973)、Griffelの式(1965)、Zenkevichの式(1959)、Mirshakの式(1959)、Inasakaの式(1992)、Celataの式(1994)、そしてVandervoltの式(1994)と本実験データの比較を行った。これらの式の適用範囲と式、そして実験データとの比較結果を以下に示す。

(1.1) Knoebel (1973) による相関式

表4.4 Knoebelの式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	u_{in} [m/s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
9.5	610	3 - 7.5	0.4 - 1.0	8 - 15

$$q = 4.85 \times 10^5 \left(1 + 1.71 \times 10^{-4} G \right) \left(1 + 0.124 \cdot \Delta T_{sub} \right) \quad (4.14)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

q	:	限界熱流束	W/m ²
G	:	質量速度	kg/m ² s
ΔT_{sub}	:	入口サブクール度	K

図4.8の(1)にKnoebelの式とバーンアウト時の出口クオリティが負となる実験データ(以後、サブクール領域の実験データと呼ぶ。)を比較した結果を示す。

図4.8の(1)から、Knoebelの式は、実験データに対して50%以下の低い値に計算されることがわかった。

(1.2) Griffel (1965) による相関式

表4.5 Griffelの式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	u_{in} [m/s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
5.6 <	610 - 2000	3 - 7.5	3.4 - 10.2	8 - 15

$$q = (128.7 \cdot G + 1.21 \times 10^6) (8 + 1.8 \cdot \Delta T_{sub})^{0.27} \quad (4 \cdot 15)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

q	:	限界熱流束	W/m ²
G	:	質量速度	kg/m ² s
ΔT_{sub}	:	入口サブクール度	K

図4.8の(2)に Griffel の式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示す。

図4.8の(2)から、Griffel の式は、高熱流束域になるほど実験値に対して低く計算される傾向があることがわかった。

(1.3) Zenkevich (1959) による相関式

表4.6 Zenkevich の式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	G [kg/m ² s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
No information	340-660	833.3 - 5000	14 - 21	No information

$$q = h_{fg} \left(\frac{\sigma \cdot g \cdot G}{\nu} \right)^{1/2} \left(2.5 + 184 \frac{h_s - h_0}{h_{fg}} \right) \times 10^{-5} \quad (4 \cdot 16)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

q	:	限界熱流束	kW/m ²
G	:	質量速度	kg/m ² s
g	:	重力加速度	9.8m/s ²
σ	:	表面張力	N/m
ν	:	動粘性係数	m ² /s
h_{fg}	:	蒸発潜熱	kJ/kg
h_s	:	飽和温度での水のエンタルピー	kJ/kg
h_0	:	試験部出口での水のエンタルピー	kJ/kg

図4.8の(3)に、Zenkevich の式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示

す。

図4.8の(3)から、Zenkevich の式による予測値は、本実験データに対して-50% ~ +100%の範囲内で実験データと比較的良く一致することがわかった。

(1.4) Mirshak (1959) による相関式

表4.7 Mirshak の式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	u_{in} [m/s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
No information	No information	1.5 - 13.7	0.17 - 0.59	2.8 - 10.2

$$\left(\frac{Q}{A} \right)_{BO} = 266000 (1 + 0.0365 V) (1 + 0.00914 T_s) (1 + 0.0131 p) \quad (4 \cdot 17)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

$(Q/A)_{BO}$:	限界熱流束	pcu/hft ²
V	:	流速	kg/m ² s
T_s	:	入口サブクール度	K
p	:	圧力	psia

図4.8の(4)に Mirshak の式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示す。

図4.8の(4)から、Mirshak の式は、Griffel の式と同じ予測傾向を示し、高熱流束域になるほど実験値に対して低い値に計算されることがわかった。

(1.5) Inasaka (1992) による相関式

表4.8 Inasaka の式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	G [kg/m ² s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
1 - 3	10 - 100	7000 - 20000	0.1	2 - 18

$$q_{crit} = C \frac{H_{fg} \cdot \rho_l^{0.4}}{D_e^{0.6}} U_0^{0.4} \cdot \mu_{sat}^{0.6} \quad (4 \cdot 18)$$

ここで、定数Cは以下の式を用いて計算される。

(1. 5. 1) 低熱流束域

$$C = 0.24 - 1.91 X_{ex} + 22.9 X_{ex}^2 \quad (4 \cdot 19)$$

(1. 5. 2) 高熱流束域

$$C = 0.52 - 2.61 X_{ex} + 26.2 X_{ex}^2 \quad (4 \cdot 20)$$

(1. 5. 3) 超高熱流束域

$$C = 0.84 - 3.42 X_{ex} + 30.4 X_{ex}^2 \quad (4 \cdot 21)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

q_{crit}	:	限界熱流束	BTU/hft ²
X_{ex}	:	出口クオリティ	-
H_{fg}	:	蒸発潜熱	BTU/lb
ρ_1	:	飽和条件下での水の密度	lb/ft ³
D_e	:	水力等価直径	ft
U_0	:	主流部の速度	ft/s

図4. 8の(5)にInasakaの式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示す。

図4. 8の(5)から、Inasakaの式は、本実験範囲では実験値に対して全体的に低い値を予測する傾向があることがわかった。

(1. 6) Celata (1994) による相関式

表4. 9 Celataの式の適用範囲

D [mm]	L [mm]	G [kg/m ² s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
2 - 20	100 - 200	1300 - 40000	0.1 - 20	2 - 60

$$Bo = \frac{C}{Re^{0.5}} \quad (4 \cdot 22)$$

ここで、定数Cは以下の式を用いて計算される。

$$C = (0.27 + 5.93 \times 10^{-2} p) \psi \quad (4 \cdot 23)$$

ただし、 ψ は、下記の式を用いて計算する。

(1. 6. 1) $X_{ex} > 0.1$ の場合

$$\psi = 0.825 + 0.986 \cdot X_{ex} \quad (4 \cdot 24)$$

(1. 6. 2) $X_{ex} < 0.1$ の場合

$$\psi = 1 \quad (4 \cdot 25)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

Bo	:	ボイリング数 ($= q / (G \cdot h_{fg})$)	-
Re	:	レイノルズ数	-
X_{ex}	:	出口クオリティ	-
p	:	圧力	MPa

図4. 8の(6)にCelataの式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示す。

図4. 8の(6)から、Celataの式は、Inasakaの式と同様に、実験値に対して計算値の方が低く計算される傾向にあることがわかった。

(1. 7) Vandervolt (1994) による相関式

表4. 10 Vandervoltの式の適用範囲

D [mm]	L/D [-]	G [kg/m ² s]	P [MPa]	CHF [MW/m ²]
0.3 - 3.0	1.0 - 40.0	3,000 - 90,000	0.1 - 3.0	6 - 200

$$\begin{aligned}
 (q/A)_{cr} = & 17.05 \left[(G')^{0.0732+0.2390(D')} \right] \\
 & \times \left[(T')^{0.3060(G')+0.001730(T')-0.0353(D')} \right] \\
 & \times \left[(P')^{-0.1289} \right] \\
 & \times \left[1 + 0.01213(D')^{-2.946+0.7821(G')+0.009299(T')} \right] \\
 & \times \left[1.540 - 1.280(L/D)' \right]
 \end{aligned}
 \quad (4 \cdot 26)$$

ただし、

$$\begin{aligned}
 G' &= 0.005 + G / 10^5 \quad : \quad [kg / m^2 s] \\
 T' &= 5 + \Delta T_{sub} \quad : \quad [C] \\
 P' &= (0.0333 + P) / 3.0 \quad : \quad [MPa] \\
 D' &= D / 0.003 \quad : \quad [m] \\
 (L/D)' &= (L/D) / 40
 \end{aligned}
 \quad (4 \cdot 27)$$

ただし、使用単位は以下に示すとおりである。

$$(q/A)_{cr} \quad : \quad \text{限界熱流束} \quad W/m^2 \quad -$$

図4. 8の(7)に Vandervolt の式とサブクール領域の実験データを比較した結果を示す。

Vanderbolt の式は、本実験条件に比較的近く、最新の相関式である。しかし、本研究で得られた実験結果との比較結果は、図4. 8の(7)のようになり、本実験条件では予測精度が低下することが確認された。

以上のように本実験データを高精度で予測できる実験相関式は、現在までに報告がなされていない。

Kutateladze (1952)、Zenkevich (1957) の論文で、DNB型バーンアウトに関しいくつかの主要な無次元数が次元解析により導出されている。本研究では、これらの論文と実験データをもとに、いくつかの無次元数の組み合わせでデータ整理を試みた。そして、ボイリング数(Bo)と $\sqrt{G \cdot \nu / \sigma}$ (無次元数)の積が、バーンアウト時の出口クオリティ X_{ex} の1次関数としてよく近似できることがわかった。

そこで、本実験データの範囲内で適用できる実験式として、本実験データをもとに簡単

な無次元式にまとめてみた。式を下記に記す。

$$Bo = (2.3 - k \cdot X_{ex}) \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\sigma}{G \cdot \nu}} \quad (4 \cdot 28)$$

ただし、使用記号は以下に示すとおりである。

$$\begin{aligned}
 Bo &: \quad \text{ボイリング数} \quad (= q / (G \cdot h_{fg})) \quad - \\
 X_{ex} &: \quad \text{出口クオリティ} \quad - \\
 \sigma &: \quad \text{表面張力} \quad N/m \\
 G &: \quad \text{質量速度} \quad kg/m^2 s \\
 \nu &: \quad \text{動粘性係数} \quad m^2/s \\
 k &: \quad \text{定数} \\
 L > 10mm \text{ の場合} &: \quad k = 54 \\
 L \leq 10mm \text{ の場合} &: \quad k = 93
 \end{aligned}$$

図4. 8の(8)に(4・28)式とサブクール実験データを、比較した結果を示す。

図4. 8の(8)から(4・28)式により、本実験データを、-30%～+80%の範囲内で、予測できることが確認された。

(2)機構論的モデルの評価

DNB型のバーンアウトモデルとして、第一章に記した様に幾種もの機構論的モデルが提案されている。これらのモデルの中で、最も可視化観察結果とモデルの仮定が近いと思われる薄液膜ドライアウトモデル (Celata モデル ; 1994) (Katto モデル ; 1992) と、近年再評価されている気泡充満モデル (Weisman - Pei モデル ; 1983)を、本実験データと比較し、評価を行った。

以下に、薄液膜ドライアウトモデルに基づく、Katto モデル、Celata モデル、そして気泡充満モデルに基づく、Weisman - Pei モデルのそれぞれの特徴と実験結果と比較した結果を示す。また、各モデルの概念図を付録Cに付したので参照していただきたい。

(2. 1) Katto モデル(1992)の適用性の評価

Katto モデルの考え方

加熱壁面上に沸騰による蒸気の集合した蒸気スラグ（長さ L_B 、流速 U_B ）と加熱面の間に薄液膜が存在し、この蒸気スラグ先端の液膜部分（初期厚さ δ ）が蒸気スラグの通過時間 $\tau = L_B / U_B$ の終わりに蒸発消滅するとき CHF が発生する。（参照：付録 C）

Katto モデルの構成モデル

1. 薄液膜の初期厚さ

薄液膜の初期厚さ δ は、加熱面上の活性点に立つ蒸気ジェットの気液界面の流体力学的不安定により決まる。ただし、壁面から流体に伝わる熱流束の内、強制対流伝熱分を差し引いた残りが沸騰に寄与するとする。強制対流熱伝達率は Dittus-Boelter 式（1930）で与えられ、壁温と液温の差は Shah の式（1977）による。

$$\delta = \frac{\pi(0.0584)^2}{2} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{\rho_g}{\rho_f} \right) \left(\frac{\sigma}{\rho_g} \right) \left(\frac{\rho_g \cdot h_{fg}}{q_B} \right)^2 \quad (4 \cdot 29)$$

$$q_B = q_{assumed} - q_{FC} = q_{assumed} - h_{FC} (T_w - T_f) \quad (4 \cdot 30)$$

$$h_{FC} = 0.023 \left(\frac{G \cdot D}{\mu_f} \right)^{0.8} \text{Pr}^{0.4} k_f / D \quad (4 \cdot 31)$$

$$T_w - T_f = \left[(\Phi_0 - 1)(T_{sat} - T_f) + (q_{assumed} / h_{FC}) \right] / \Phi_0 \quad (4 \cdot 32)$$

$$\Phi_0 = 230 \left[q_{assumed} / (G \cdot h_{fg}) \right]^{0.5} \quad (4 \cdot 33)$$

ここで、 q_{FC} はサブクール液への強制対流熱伝達量、 h_{FC} は、強制対流熱伝達係数、 T_w は壁面温度、 k_f は液熱伝導率を表す。

2. 蒸気スラグの長さ

蒸気スラグの長さ L_B は、気液界面の Helmholtz 不安定の臨界波長で与えられる。

これは、Lee-Mudawar モデル（1988）と同様である。

$$L_B = 2\pi\sigma(\rho_g - \rho_f) / (\rho_g \cdot \rho_f \cdot U_B^2) \quad (4 \cdot 34)$$

3. クオリティ

クオリティの計算は、プロファイル法による。ここではサブクール液による蒸気の凝縮作用の効果も考慮している。なお、物性値は飽和液体の値を使用している。

$$X = \frac{X_e - X_{en} \cdot \exp(X_e / X_{en} - 1)}{1 - X_{en} \cdot \exp(X_e / X_{en} - 1)} \quad (4 \cdot 35)$$

ここで、正味蒸気発生開始点での平衡クオリティ X_{en} は、次式で示される Saha-Zuber の式(1974)で与えられる。

$$Pe_f = G \cdot Cp_f \cdot D / k_f \quad \text{とすると}$$

$Pe_f < 70000$ の場合

$$X_{en} = -0.0022 \left[q / (\rho_f \cdot h_{fg}) \right] \left[D \cdot Cp_f \cdot \rho_f / k_f \right] \quad (4 \cdot 36)$$

$Pe_f > 70000$ の場合

$$X_{en} = -154 \left[q / (\rho_f \cdot h_{fg}) \right] \left[1 / (G / \rho_f) \right] \quad (4 \cdot 37)$$

なお、 X_e が X_{en} より小さくなれば $X = 0$ とする。

4. 均質二相流の平均密度と平均粘性係数

粘性係数としては Beattie-Whalley の式を使用。

$$\rho_{avg} = 1 / \left[X / \rho_g + (1 - X) / \rho_f \right] \quad (4 \cdot 38)$$

$$\mu_{avg} = \mu_g \alpha + \mu_f (1 - \alpha) (1 + 2.5\alpha) \quad (4 \cdot 39)$$

5. ボイド率

ボイド率は、クオリティより、均質流モデルにより求める。

$$\alpha = X / \left[X + (1 - X) (\rho_g / \rho_f) \right] \quad (4 \cdot 40)$$

6. 均質二相流速度分布

均質二相流中の密度、粘性係数を用いて、カルマンの三領域速度分布則を適用して速度分布を求める。

$$Y^+ = \delta \left(\tau_w / \rho_{avg} \right)^{0.5} / \left(\mu_{avg} / \rho_{avg} \right) \quad (4 \cdot 41)$$

$$U^+ = U / \left(\tau_w / \rho_{avg} \right)^{0.5} \quad (4 \cdot 42)$$

$$\begin{aligned} U^+ &= Y^+ & (0 < Y^+ < 5) \\ U^+ &= 5 + 5 \ln(Y^+ / 5) & (5 < Y^+ < 30) \\ U^+ &= 5.5 + 2.5 \ln Y^+ & (30 < Y^+) \end{aligned} \quad (4 \cdot 43)$$

$$\tau_w = f \cdot \rho_{avg} \left(G / \rho_{avg} \right)^2 / 8 \quad (4 \cdot 44)$$

7. 摩擦係数

摩擦係数はプラントル・カルマン式による。

$$1 / f^{0.5} = 2.0 \log_{10} \left(\text{Re} \cdot f^{0.5} \right) - 0.8 \quad (4 \cdot 45)$$

$$\text{Re} = G \cdot D / \mu_{avg} \quad (4 \cdot 46)$$

8. 蒸気スラグ速度

蒸気スラグ速度は、壁面からの距離が薄液膜厚さに等しい位置での均質二相流速度の κ 倍と仮定する。 κ は1より小さい定数で、速度係数と称する。ここでは、蒸気スラグの厚さは薄液膜の厚さに比べて十分小さいと仮定している。

$$U_B = \kappa \cdot U \quad (4 \cdot 47)$$

9. 速度係数 κ

κ は気液密度比、レイノルズ数、及びボイド率の関数として実験式で表現される。ここでは、低圧用の計算式を用いた。

$$\kappa = 22.4 \left[1 + K_3 (0.355 - \alpha) \right] / \left(\rho_g / \rho_f \right)^{1.28} \text{Re}^{-0.8} \quad (4 \cdot 48)$$

ただし、 $\alpha > 0.355$ のとき、 $K_3 = 0$ 、 $\alpha < 0.355$ のとき、 $K_3 = 1.33$ である。

10. 蒸気スラグの通過時間 τ

$$\tau = L_B / U_B \quad (4 \cdot 49)$$

11. 限界熱流束 q', q_{CHF}

$$q' = \delta \cdot \rho_f \cdot h_{fg} / \tau \quad (4 \cdot 50)$$

初期設定熱流束 $q_{assumed}$ と q' が一致するように収束計算を行い、十分な精度で一致した時の熱流束を限界熱流束 q_{CHF} とする。

Katto モデルの評価

Katto モデル では、上記のようにサブクール気泡下の薄液膜がドライアウトする値を解析的に計算している。

図4.9の(1)、(2)は、横軸がモデルに与える熱流束の仮定値 q_{assumed} を、縦軸がモデルによって計算される熱流束値 q' を表している。収束計算によって $q' = q_{\text{assumed}}$ となる熱流束が限界熱流束 CHF であり、この値を図中では○で示している。また、図4.9の(1)、(2)では、参考のために加熱部出口でのボイド率の計算値を右縦軸に示している。

図4.9の(1)は、管内径が1mm、 L/D が5、入口水温が19.2℃、質量速度が19130 kg/m²s (以下、Case 1と呼ぶ。)でのKattoモデルの特性関数を示しており、3つの解を持つことが分かる。図4.9の(2)は、管内径が6mm、 L/D が25、入口水温が14.9℃、質量速度が1494 kg/m²s (以下、Case 2と呼ぶ。)でのKattoモデルの特性関数を示しており、この条件では解は1つである。また、Kattoモデルの特徴の1つに、解から仮定値が離れている場合、計算値が極めて大きな値に計算されることがある。このような特性を有するため、Kattoモデルを用いて計算を進めるためには以下のような配慮が必要である。

- (1) モデルの解が複数個存在する場合がある。このため特性関数を調べ、どの解が最適解であるかを検討し選択する必要がある。
- (2) 収束解から極端に離れた仮定値をモデルに入力した場合、計算機がエラーを返す場合がある。

以上のような特性を持つため、特性関数の変化を調べた。その結果、図4.9の(2)のように、最小解と中央の解近傍で特性関数が大きく変化し、特殊な条件以外では解を持たなくなり、最大解のみが解として存在することが分かった。

図4.10の(1)に最小解を解として選択した場合のKattoモデルの計算値と実験値の比較結果を示す。また、図4.10の(2)に最大解を解として選択した場合のKattoモデルの計算値と実験値の比較結果を同様に示す。最小解を解として計算した場合には、図4.10の(1)のように計算値にばらつきが生じることがわかる。最大解を解として選択した結果(図4.10の(2))、計算値のばらつきが小さくなった。しかし、Kattoモデルは本実験条件では実験値に対して高めに計算される傾向があることが分かった。また、図4.10の(1)、(2)の最大解のときのボイド率が1に近い値に計算されていることから分かるように、本実験条件をKattoモデルに代入して計算されるボイド率はすべて0.9以上となる。これは、「バーンアウト発生位置でのボイド率が0.7以下」というモデルの適用範囲を超えてしまうことを示している。この高ボイド率に計算される点に関して、Celataら(1994)の論文でも指摘がなされている。このボイド率が高めに計算される原因の1つに、モデル中でSahaら(1974)によるクオリティの計算式(4.36式、4.37式)

が採用されていることがあげられる。この式のもととなった実験データの範囲($D > 7$ mm)外への適用は好ましくない結果を生ずることとなるので、本研究のように微小加熱部では、不適切なクオリティ値が計算されている可能性がある。

(2.2) Celata モデル(1994)の適用性の評価

Celata モデルの考え方

Celataモデルは、Kattoモデルと同様にサブクール気泡下の薄液膜がドライアウトする値から、CHFを計算するモデルである。しかし、実験パラメータを必要とせず、すべて解析的にCHFが計算されるところに特徴がある。Lee - Mudawarモデル(1988)やKattoモデル(1992)が、壁面温度の計算に壁面熱伝達相関式を用いていることに対して、Celataモデルは、熱バランスの式と管内水温分布式から直接計算している。そして、蒸気泡は加熱液層内のサブクール液と接する位置に存在すると仮定している。(参照：付録C)

Celata モデルの構成モデル

1. 各種物性値の計算
必要な物性値は、 C_{pf} , k_f , μ_f , λ , ρ_f , ρ_g , σ であり、これらは飽和温度での値を用いる。
2. 熱流束 q_{assumed} を仮定
3. 壁面温度 T_w
円管内の液温分布を考える。

$$T_{in} + \frac{q_{\text{assumed}} S}{\Gamma C_{pf}} = \frac{5}{y^+(R)} T_{m1} + \frac{25}{y^+(R)} T_{m2} + \frac{y^+(R) - 30}{y^+(R)} T_{m3} \quad (4.51)$$

ただし、

$$\begin{aligned} T_w - T &= Q P r y^+ & 0 \leq y^+ < 5 \\ T_w - T &= 5Q \left\{ Pr + \ln \left[1 + Pr \left(\frac{y^+}{5} - 1 \right) \right] \right\} & 5 \leq y^+ < 30 \end{aligned}$$

$$T_w - T = 5Q \left[Pr + \ln(1 + 5Pr) + 0.5 \ln\left(\frac{y^+}{30}\right) \right] \quad y^+ \geq 30 \quad (4 \cdot 52)$$

$$Q = \frac{q_{assumed}}{\rho_f C_{pf} U_\tau} \quad (4 \cdot 53)$$

Celata の論文 (1994)中では、管内の水温度分布上記のように3領域に分けて、それぞれ記述してある。しかし、実際に計算機内でプログラムを実行する際には、 T_w を以下の式まで解析的に導出して用いる方が簡便である。

$$T_w = T_m + \frac{5Q}{y^+(R)} \left\{ Pr \left[\frac{2y^+(R) - 5}{2} \right] + \frac{5}{Pr} \left[(1 + 5Pr)(\ln(1 + 5Pr) - 1) + 1 \right] \right. \\ \left. + \ln(1 + 5Pr) \left[y^+(R) - 30 \right] + \frac{y^+(R) \left[\ln\left(\frac{y^+(R)}{30}\right) - 1 \right] + 30}{2} \right\} \quad (4 \cdot 54)$$

ただし、

$$T_m = T_{in} + \frac{q_{assumed}}{\Gamma C_{pf}} \quad Q = \frac{q_{assumed}}{\rho_f C_{pf} U_\tau} \quad U_\tau = \frac{G}{\rho_f} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad y^+ = \frac{y}{v_f} U_\tau \quad (4 \cdot 55)$$

である。

上記の液温度分布から、壁面から無次元距離 $y^+ = y^*$ で飽和温度になるとし ($T(y^*) = T_{sat}$)、この y^* を繰り返し計算から算出する。

4. 蒸気スラグの等価直径 D_B

$$D_B = \frac{32}{f} \frac{\sigma f(\beta) \rho_f}{G^2} \quad (4 \cdot 56)$$

5. 摩擦係数 f

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2.0 \log \left(\frac{0.72 \sigma \rho_f}{f D G^2} + \frac{9.35}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4 \cdot 57)$$

6. 薄液膜の初期厚さ δ

$$\delta = y^* - D_B \quad (4 \cdot 58)$$

7. 抗力係数 C_D

$$C_D = \frac{2}{3} \frac{D_B}{\left(\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{0.5}} \quad (4 \cdot 59)$$

8. 蒸気スラグの上昇速度 U_B

$$U_B = \left(\frac{2L_B g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f C_D} \right)^{0.5} + 0.125 f \left(\delta \frac{D_B}{2} \right) \frac{G^2}{\rho_f \mu_f} \quad (D \leq y^+ < 5)$$

$$U_B = \left(\frac{2L_B g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f C_D} \right)^{0.5} + 1.768 \sqrt{f} \frac{G}{\rho_f} \left\{ \ln \left[0.354 \frac{G}{\mu_f} \sqrt{f} \left(\delta + \frac{D_B}{2} \right) \right] - 0.61 \right\} \quad (5 \leq y^+ < 30)$$

$$U_B = \left(\frac{2L_B g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f C_D} \right)^{0.5} + 0.884 \sqrt{f} \frac{G}{\rho_f} \left\{ \ln \left[0.354 \frac{G}{\mu_f} \sqrt{f} \left(\delta + \frac{D_B}{2} \right) \right] - 2.2 \right\} \quad (y^+ \geq 30)$$

(4 · 60)

9. 蒸気スラグの長さ L_B

$$L_B = \frac{2\pi\sigma(\rho_g + \rho_f)}{\rho_g \rho_f U_B^2} \quad (4 \cdot 61)$$

10. 熱流束 q''

$$q'' = \frac{\rho_f \delta \lambda}{L_B} U_B$$

(4・62)

11. q_{assumed} と q'' が十分な精度で一致するまで収束計算を繰り返す。そして、収束値がCHFである。

上記のように Celata モデルは多くの陰関数を含むため、何重もの繰り返し計算が必要となる。そして、解を持つ範囲内であるかどうかの判断を行いながら繰り返し計算を進める必要がある。

Celata モデルの評価

図4.11の(1)に Case 1 での Celata モデルの特性関数を、図4.11の(2)に Case 2 での Celata モデルの特性関数を示す。Celata モデルは一般的には1つの解しか持たないが、加熱部長さが短い場合には、図4.11の(1)のように解を複数持ったり、実数解を持たない場合がある。複数解の場合は、図4.11の(1)のように不連続点があり、その近傍に2解がある。このような複数解の場合には、どちらが適切な解であるかを決めなければならないが、Katto モデルと同様に連続性を調べ、最小解を解とする事にした。

Celata モデルの一般的な特性関数は、図4.11の(2)に示すような曲線となり、計算不可能な範囲が存在する。そして解は一般的に計算可能な下限値に極めて近い値である。

図4.12の(1)にサブクール領域の実験データと Celata モデルにより実数解が得られた場合の計算値を比較した結果を示す。Celata モデルを本実験条件のように短い加熱部にまで適用を試みた結果、後述するように、Celata モデル内で計算される蒸気スラグの長さ L_b が、加熱部長さ L より長く計算される場合がある。図4.12の(1)には、このようにモデルの基本概念から離れるような計算結果も含まれている。そこで、物理的に不合理と思われる $L_b > L$ となる計算値を図から削除した結果を図4.12の(2)に示す。

図4.12の(1)、(2)から、Celata モデルの計算を行い解が得られ、かつ $L_b > L$ となる計算値のみを実験値と比較した場合には、実験値に非常に近い値を予測していることが分かる。

L/D が2.5以上では、モデルの物理的条件を満たし適切な解が得られるが、 L/D が2.5以下の場合には、(1) 解を持たない、(2) 複数解となる、(3) $L_b > L$ と計算される、(4) 壁面温度が高めに計算される、といった適用上の問題が発生することが明らかとなった。

(2.3) Weisman - Pei モデル(1983) の適用性の評価

Weisman - Pei モデルの考え方

加熱面に沿って気泡層が形成され、バーンアウト発生時にはこの気泡層が成長し、壁面近傍の乱流渦による気泡の壁面垂直方向移動が十分起らない限界まで厚くなり、気泡層内のボイド率がある限界値を超えるとバーンアウトが発生する (参照：付録C)

Weisman - Pei モデルの構成モデル

1. 各種物性値を計算
2. 熱流束 q'' を仮定
3. 気泡離脱点での液エンタルピー h_{ld} (Levy のサブクール沸騰モデル)

$$Re = GD / \mu_f \quad (4 \cdot 63)$$

$$H_l = 0.023 Re^{0.3} Pr^{0.4} k_f / D \quad (4 \cdot 64)$$

$$f = 0.0055 \left\{ 1 + [20000(\varepsilon / D) + 10^6 / Re]^{1/3} \right\} \quad (\text{Waggener}) \quad (4 \cdot 65)$$

ここで $\varepsilon / D = 0.0001$

$$Y_b^+ = 0.01 (\sigma D \rho_f)^{0.5} / \mu_f \quad (4 \cdot 66)$$

$0 \leq Y_b^+ \leq 5$ の場合

$$h_{f \text{ sat}} - h_{fd} = C_{pf} q'' / H_l - q'' Pr Y_b^+ / [G(f/8)^{0.5}]$$

$5 \leq Y_b^+ \leq 30$ の場合

$$h_{f \text{ sat}} - h_{fd} = C_{pf} q'' / H_l - 5q'' \left\{ Pr + \ln [1 + Pr(Y_b^+ / 5 - 1)] \right\} / [G(f/8)^{0.5}]$$

$30 \leq Y_b^+$ の場合

$$h_{f \text{ sat}} - h_{fd} = C_{pf} q'' / H_l - 5q'' \left\{ Pr + \ln (1 + 5Pr) + 0.5 \ln (Y_b^+ / 30) \right\} / [G(f/8)^{0.5}] \quad (4 \cdot 67)$$

4. 平均クオリティ及びボイド率

ここで、Weisman - Pei モデルを計算機でプログラムする際、サブクール領域のクオリティの計算にプロファイル法により熱平衡クオリティと平均クオリティの関係を与え、正味蒸気発生位置での平衡クオリティを Lavy のモデル(1966)ではなく、Saha - Zuber の式(1974)を用いて計算した。Weisman らの論文の中では両式の結果が良く一致しているとの評価されており、結果に大きな違いはないものと考えられる。

$$X_{avg} = \frac{X_e - X_{en} \exp(X_e / X_{en} - 1)}{1 - X_{en} \exp(X_e - X_{en} - 1)} \quad (4 \cdot 68)$$

ここで、
 X_e = 熱力学的平衡クオリティ (熱バランスの式により与えられる)
 X_{en} = 正味蒸気発生開始点での平衡クオリティであり Saha-Zuber の式で計算した

$$Pe = GC_{pf}D / k_f \text{ とすると}$$

$Pe < 70000$ の場合

$$X_{en} = -0.0022 \left[q'' / (\rho_f h_{fg}) \right] \left[DC_{pf} \rho_f / k_f \right]$$

$Pe > 70000$ の場合

$$X_{en} = -154 \left[q'' / (\rho_f h_{fg}) \right] \left[1 / (G / \rho_f) \right] \quad (4 \cdot 69)$$

$$\alpha_{avg} = X_{avg} / \left[X_{avg} + (1 - X_{avg}) (\rho_g / \rho_f) \right] \quad (4 \cdot 70)$$

5. 平均密度、平均粘性係数

$$\rho_{avg} = 1 / \left[X_{avg} / \rho_g + (1 - X_{avg}) / \rho_f \right] \quad (4 \cdot 71)$$

$$\mu_{avg} = \mu_f \exp \left[2.55 \alpha_{avg} / (1 - 39 \alpha_{avg} / 64) \right] \quad (4 \cdot 72)$$

6. 平均気泡径

$$D_p = 0.015 \left[8 \sigma D \rho_{avg} / (f G^2) \right]^{0.5} \quad (4 \cdot 73)$$

7. 気泡層とコア層の境界における乱流強度 i_b の計算

$$i_b = 0.790 \left(GD / \mu_{avg} \right)^{-0.1} \left(D_p / D \right)^{0.6} \left[1 + a (\rho_f - \rho_g) / \rho_g \right] \quad (4 \cdot 74)$$

ここで a は実験定数で以下の値となる

$$\begin{aligned} a &= 0.135 & (G \leq 9.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{h}) \\ a &= 0.135 \left[G / (9.7 \times 10^6) \right]^{-0.3} & (G > 9.7 \times 10^6 \text{ kg/m}^2\text{h}) \end{aligned} \quad (4 \cdot 75)$$

8. 乱流による横方向速度の式に含まれる Φ ファクター
横方向変動速度 v' の標準偏差

$$\sigma_{v'} = i_b G / \rho_{avg} \quad (4 \cdot 76)$$

全熱流束のうち蒸気発生に寄与する分

$$q_b'' = q'' (h_f - h_{fd}) / (h_{fsat} - h_{fd}) \quad (4 \cdot 77)$$

蒸気発生による横方向速度

$$v_{jl} = q_b'' / (\rho_g h_{fg}) \quad (4 \cdot 78)$$

乱流によるコア層から気泡層への横方向速度を次式で表現 (Pei による)

$$G_3 = G \Phi i_b \quad (4 \cdot 79)$$

ここで、

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-0.5 (v_{jl} / \sigma_{v'})^2 \right] - 0.5 (v_{jl} / \sigma_{v'}) \operatorname{erfc} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} v_{jl} / \sigma_{v'} \right) \quad (4 \cdot 80)$$

9. 気泡層の厚さ、気泡層及びコア層の密度及びクオリティ

気泡層の厚さ

$$s = \kappa D_p$$

(4・81)

κ は実験定数で、ここでは $\kappa = 5.5$ とする

気泡層のボイド率 $\alpha_b = 0.82$ と仮定する

気泡層のクオリティ

$$X_b = \frac{\alpha_b \rho_g / \rho_f}{1 - (1 - \rho_g / \rho_f) \alpha_b}$$

(4・82)

気泡層の密度

$$\rho_b = 1 / [X_b / \rho_g + (1 - X_b) / \rho_f]$$

(4・83)

コア層の密度

$$\rho_c = \rho_{avg} r_0^2 / (r_0 - s)^2 - 2\rho_b (r_0 - 0.5s) s / (r_0 - s)^2$$

(4・84)

ただし、 $r_0 = D/2$

コア層のボイド率

$$\alpha_c = (\rho_f - \rho_c) / (\rho_f - \rho_g)$$

(4・85)

コア層のクオリティ

$$X_c = \frac{\alpha_c \rho_g / \rho_f}{1 - (1 - \rho_g / \rho_f) \alpha_c}$$

(4・86)

10. CHF の計算

CHF 発生時の気泡層内の質量バランスにより次式を得る

$$\frac{q_{CHF}''}{h_{fg} G} \frac{(h_l - h_{fd})}{(h_{fsat} - h_{fd})} = (X_b - X_c) \Phi i_b$$

(4・87)

11. 収束計算

q'' と q_{CHF}'' が十分な精度で一致するまで収束計算を繰り返す

Weisman - Pei モデルの評価

図4.13の(1)に Case 1 での Weisman - Pei モデルの特性関数を、図4.13の(2)に Case 2 での Weisman - Pei モデルの特性関数を示す Weisman - Pei モデルは、図中の○で示す熱流束で解を1つ持つ。また特に計算不可能な領域も存在しない。そのため Katto モデルや Celata モデルと比較すると収束計算は簡単である。

図4.14に Weisman - Pei モデルによる計算値と実験値の比較結果を示す。図4.14から、Weisman - Pei モデルは実験値に対し高めに計算される傾向があることが明らかとなった。

(2.4) 従来のモデル内で計算される物理量の比較

Katto モデル, Celata モデル, Weisman - Pei モデル内では、幾つもの物理量が計算され、CHFが決定されている。ここでは、これらのモデルで計算される物理量をそれぞれ比較することにより、それぞれのモデルの本研究範囲への適用の可能性をより詳細に検討した。

図4.15に 管内径が1mm、 L/D が5、入口水温が10℃という微小加熱部条件での各モデルの計算値を、図4.16に管内径が2.2mm、 L/D が10、入口温度が10℃での計算値を、図4.17に管内径が6mm、 L/D が25、入口温度が10℃での計算値をそれぞれ示す。そして、図4.15の(1)、図4.16の(1)、図4.17の(1)には、実験値と共に、出口クオリティが0となる線を太い実線で示してある。これらの図は、各種の物理量を質量速度の関数として示した結果であるが、ステップ状に値が変化している点等、モデル内で実際的でない計算がなされていることがわかる。特に Katto モデルと Celata モデルは、計算値に不連続な点が1箇所生じることがあり、その前後で、予測値に大きな差が生じる場合がある。Weisman - Pei モデルも、図4.15の(1)、図4.16の(1)のように、質量速度が5000 kg/m²s 近傍で計算値が大きく振動する特性がある。また、図4.15の(2)のように微小加熱部の場合には、Celata モデルは、気泡長さを加熱部の長さ以上に計算したり、壁面温度を1000℃以上と高めに計算されることがわかった、そして、これらの比較結果から、それぞれのモデル内で計算されている物理量の比較値には、かなりの差があり、現時点では、全ての物理量を的確に計

算していると思われるモデルはなかった。

§ 4. 5. 結言

本章において、小口径円管内バーンアウトに関して、以下のことが明らかとなった。

- (1) バーンアウト発生機構を、バーンアウト直前での加熱部壁面温度の変動特性と可視化観察結果をもとに、① フラッディング型 ② ドライアウト型 ③ DNB 型 に分類し、タイプ別にバーンアウト発生機構を考察した。
- (2) ドライアウト型バーンアウト用に提案された実験相関式や FIDAS コードの本研究範囲への適用の可能性を検討した。実験データとの比較から、管内径が 2 mm 以上、 L/D が 2.5 以上では、Lowdermilk の式が実験データとよく一致することが確認された。FIDAS コードの適用性及び問題点を検討した結果、 L/D が 5.0 以上では、実験データと比較的よく一致するが、 L/D が 2.5 以下では予測誤差が大きくなること、そして高流量域での計算条件の設定時に数値不安定が生じたり、液滴割合を過小評価する等の問題が生じることがわかった。
- (3) DNB 型バーンアウト用に提案された実験相関式や機構論的モデルの本研究範囲への適用の可能性を検討した。実験データとの比較から、従来の相関式の中では Zenkevich の式が、最も実験データと一致することがわかった。本章では、本実験で得られた CHF をよりの確に予測できる簡単な実験相関式も併せて示した。従来の DNB 型のバーンアウトタイプ用に提案された機構論的モデルと実験データを比較し、適用性の評価を行った。そして、Katto モデル, Celata モデル, Weisman - Pei モデルの特性関数から本研究条件への適用上の問題点を示した。CHF 値の予測に関しては、Celata モデルが加熱部長さが短い場合に幾らかの適用上の問題が生じるものの、各物理量がモデルの仮定する条件内にある場合には、最も実験値に近い値を予測することがわかった。また、Katto モデル, Celata モデル, Weisman - Pei モデル内で計算される特性関数と物理量の変化を詳細に検討し、それぞれのモデルによる物理量の計算値を評価した。その結果、特に小口径で短加熱部円管の場合に解を得られなかったり複数解を持つことがあり、モデルが不連続な特性を持つ場合もあることがわかった。また最終的な CHF の予測値が実験結果に近い値であっても、モデルにより計算される物理量が非現実的な値になる場合があり、適用上の注意が必要であることが明らかとなった。

小口径円管内強制流動時の限界熱流束予測法を、本章で得られた結論をもとに整理した。これを図 4. 18 に示す。

小口径円管内強制流動時のバーンアウトに関する今後の課題として、以下の点が考えられる。

- (1) 本研究では、主として大気圧近傍で機能する機器を研究対象とした。そのため圧力をパラメータとして実験を行っていない。今後、高圧条件下で作動し小口径円管により冷却する機器を研究対象とする場合には、圧力をパラメータとした実験、及びバーンアウト予測手法が必要である。
- (2) 小口径円管を用いることにより、極めて高い限界熱流束が達成される。しかし、CHF が 5.0 MW/m² を超える条件での可視化観察は、全周加熱円管では困難であり、また現象が極めて高速に進行することからも未だ機構論的な考察が不十分と思われる。
- (3) 従来のモデルや解析手法は一部のデータとはよく一致した。しかしながら、本研究で得られた全データを高精度で予測することはできなかった。また、観察結果と従来のモデルが仮定したイメージが必ずしも一致しておらず、モデル内部で計算される物理量の計算誤差も大きいと考えられる。以上の結論から、今後は特に超高熱流束バーンアウトの発生機構を明らかにする必要がある。

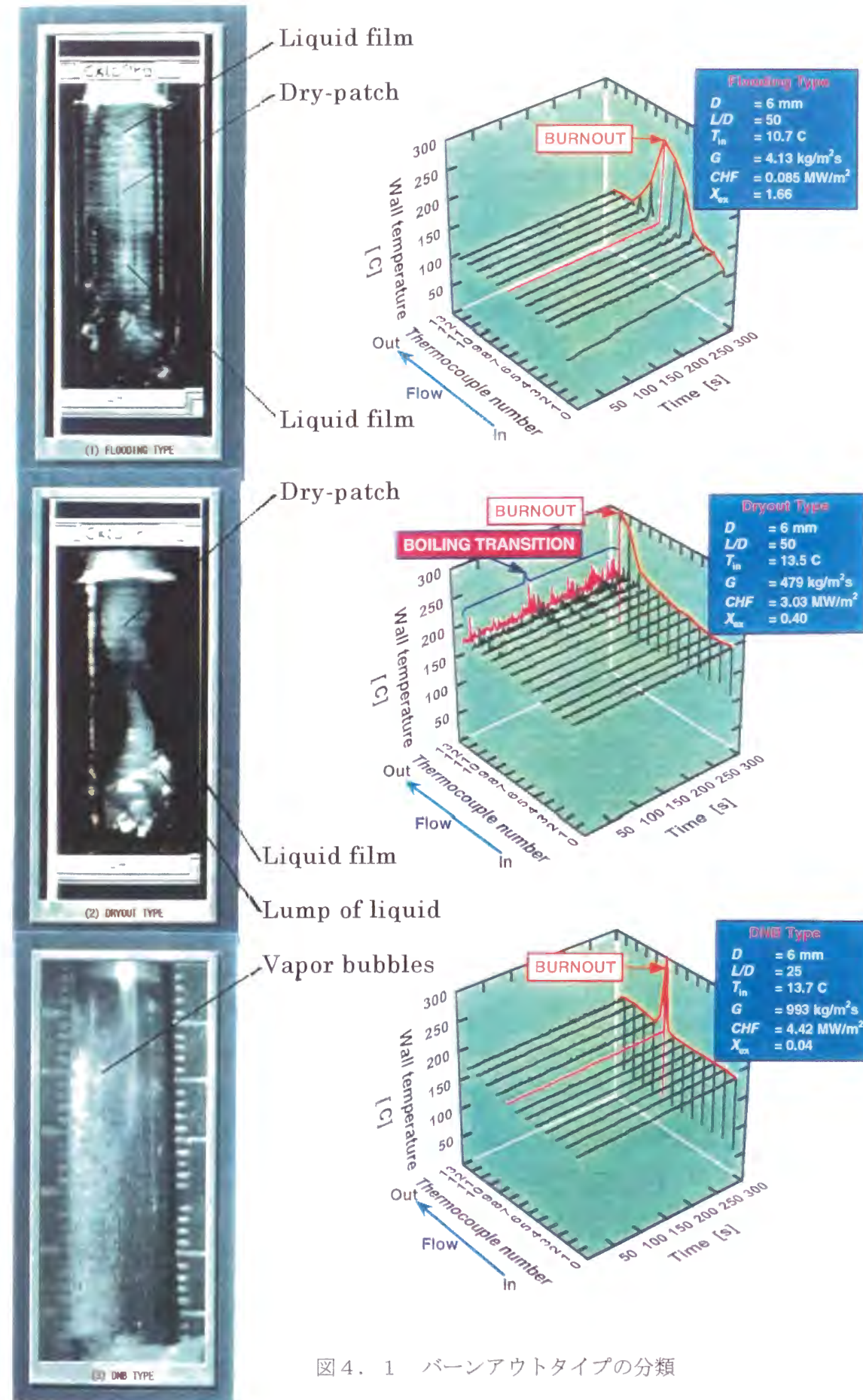


図4.1 バーンアウトタイプの分類

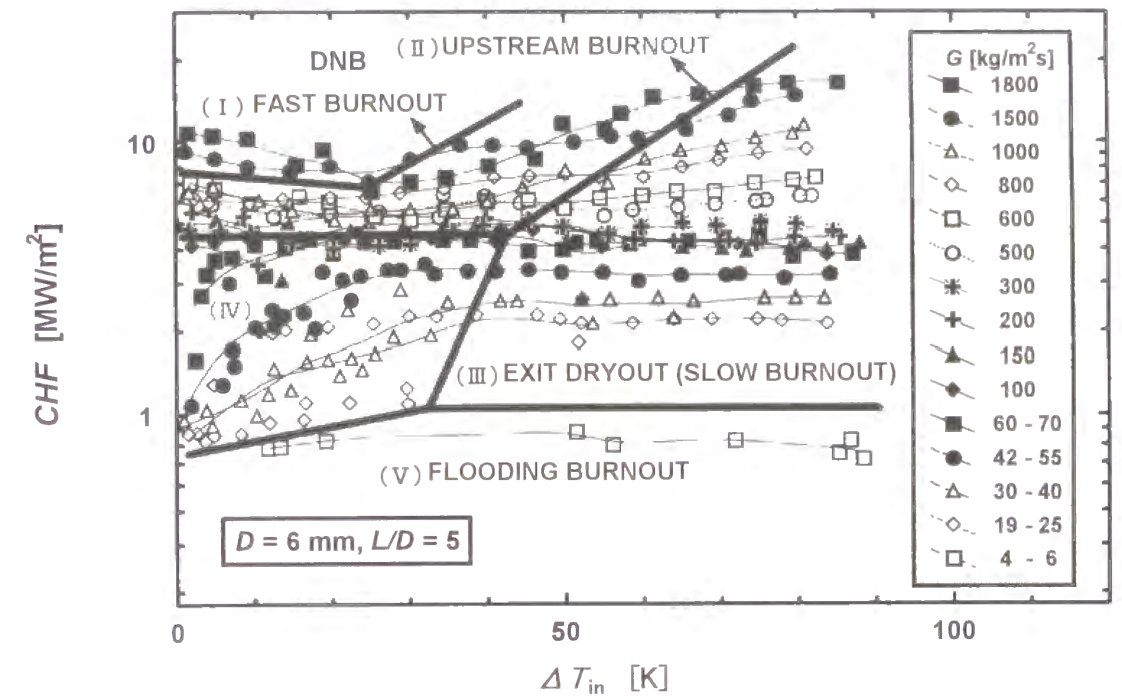


図4.2 小口径短加熱部円管内バーンアウトの分類

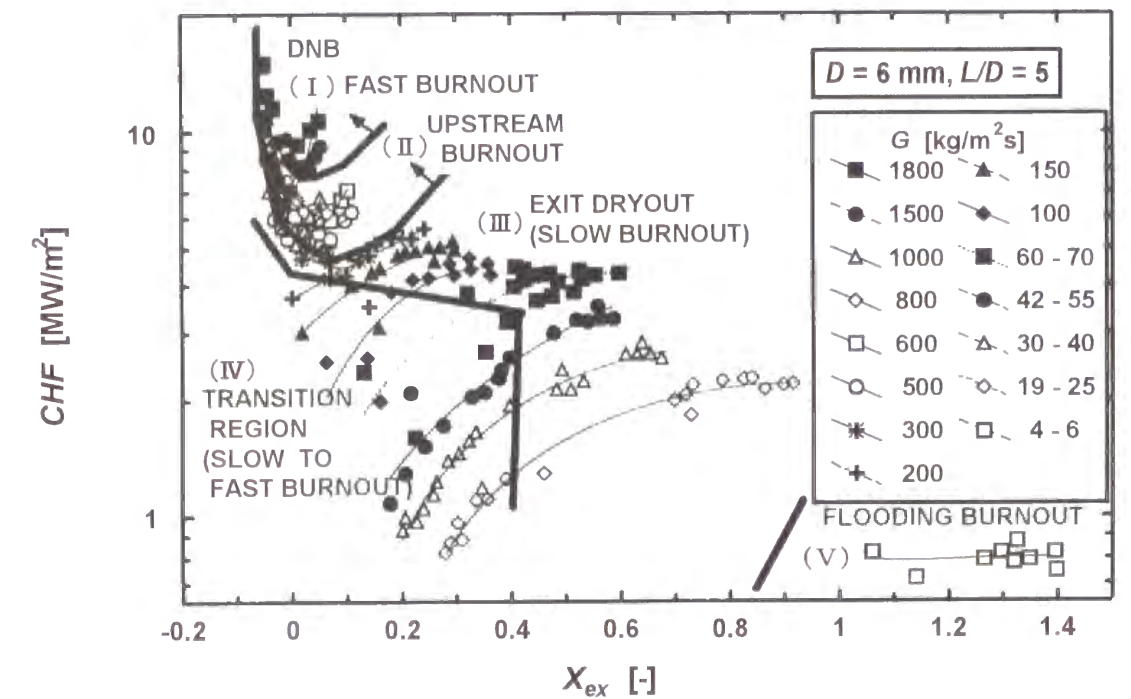
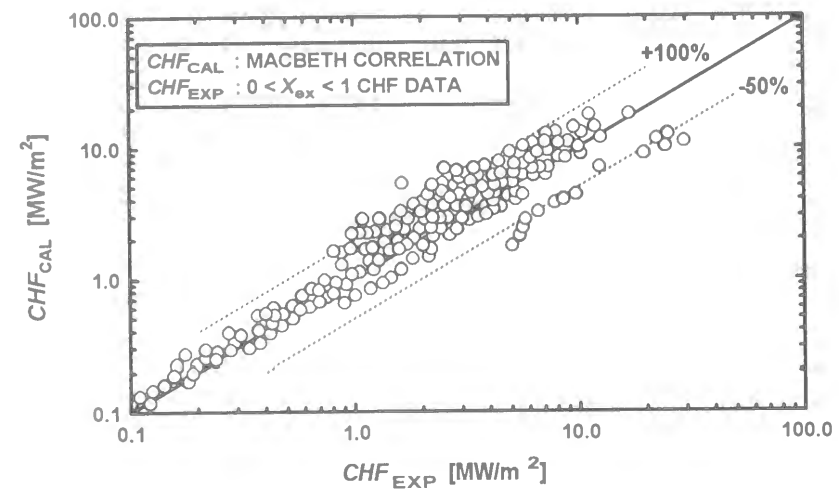
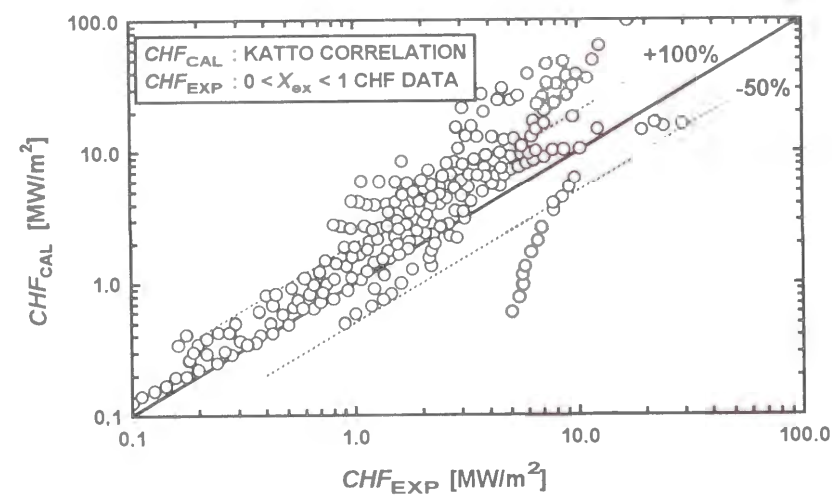


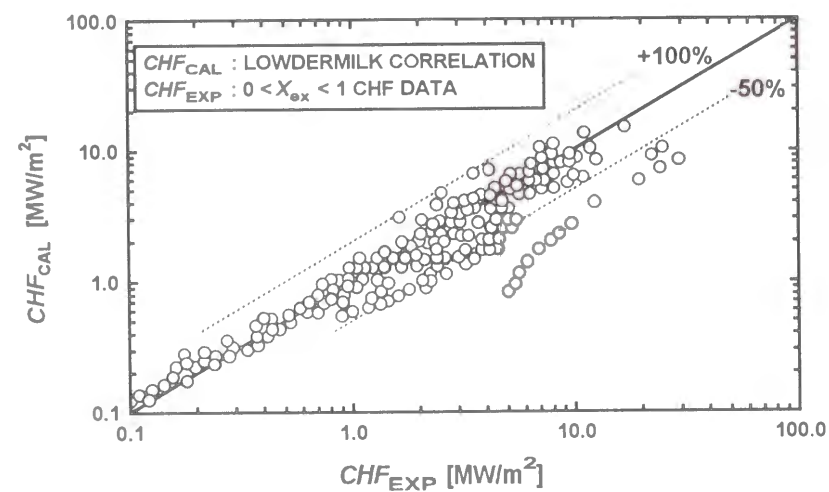
図4.3 出口クオリティとバーンアウトタイプの関係



(1) Macbeth correlation

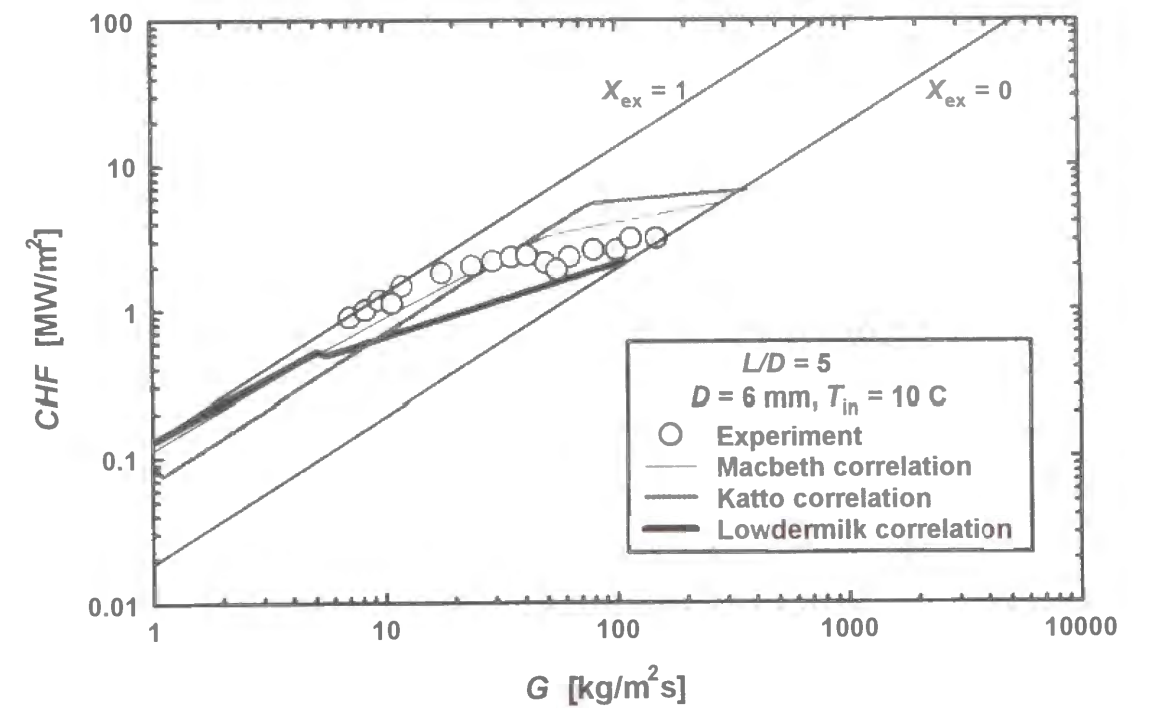


(2) Katto correlation

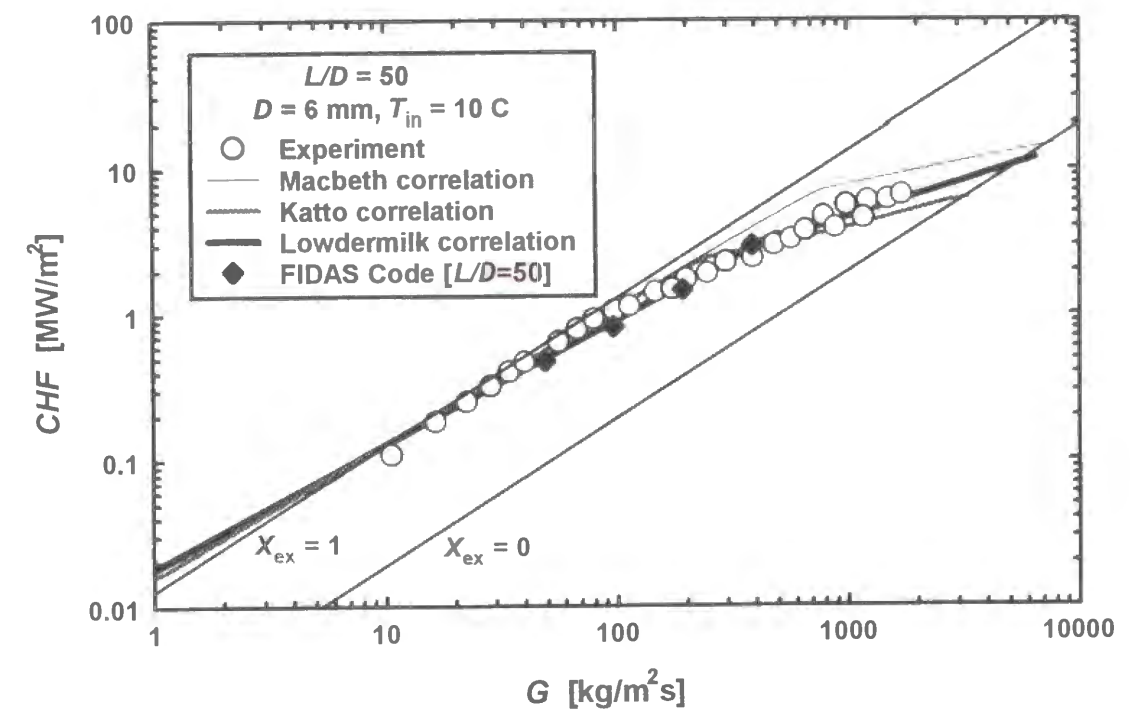


(3) Lowdermilk correlation

図4.4 ドライアウト型バーンアウト用相関式と実験値の比較

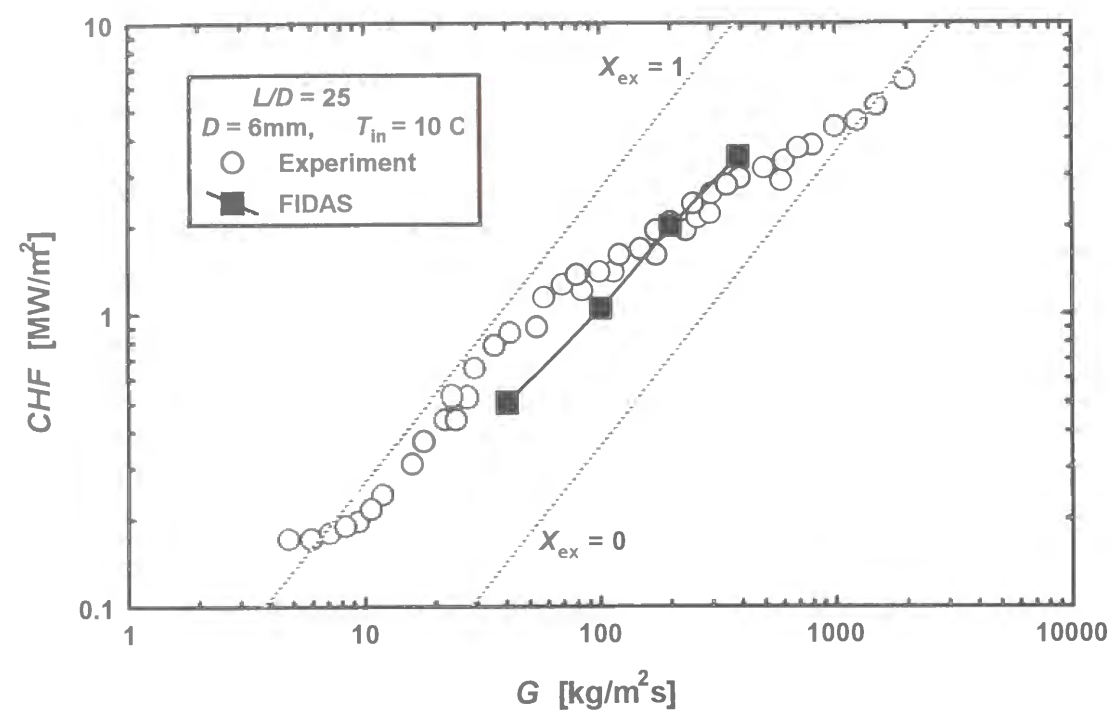


(1) $L/D = 5$

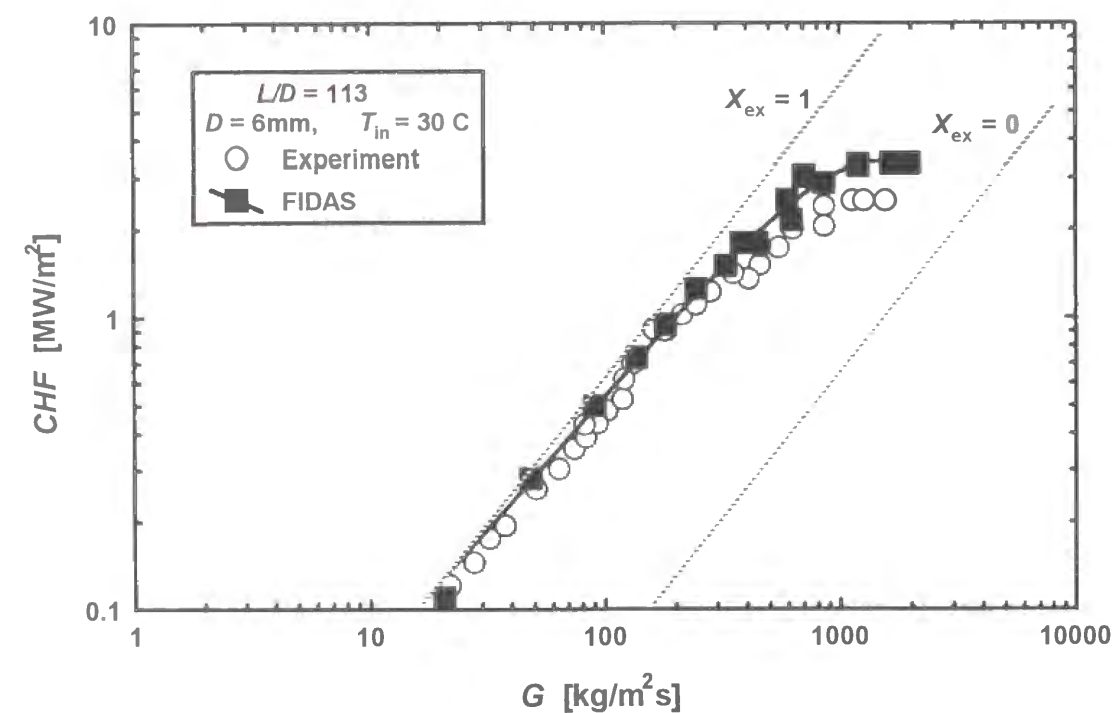


(2) $L/D = 50$

図4.5 ドライアウト型バーンアウト用相関式の予測傾向の評価

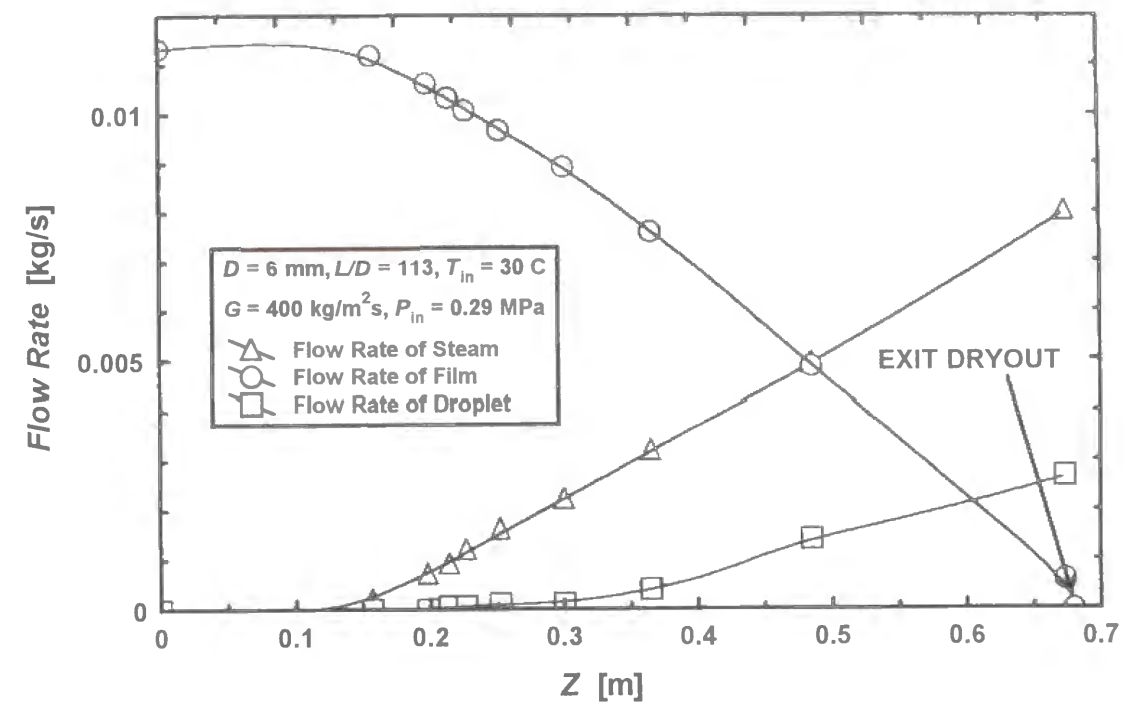


(1) $L/D = 25$

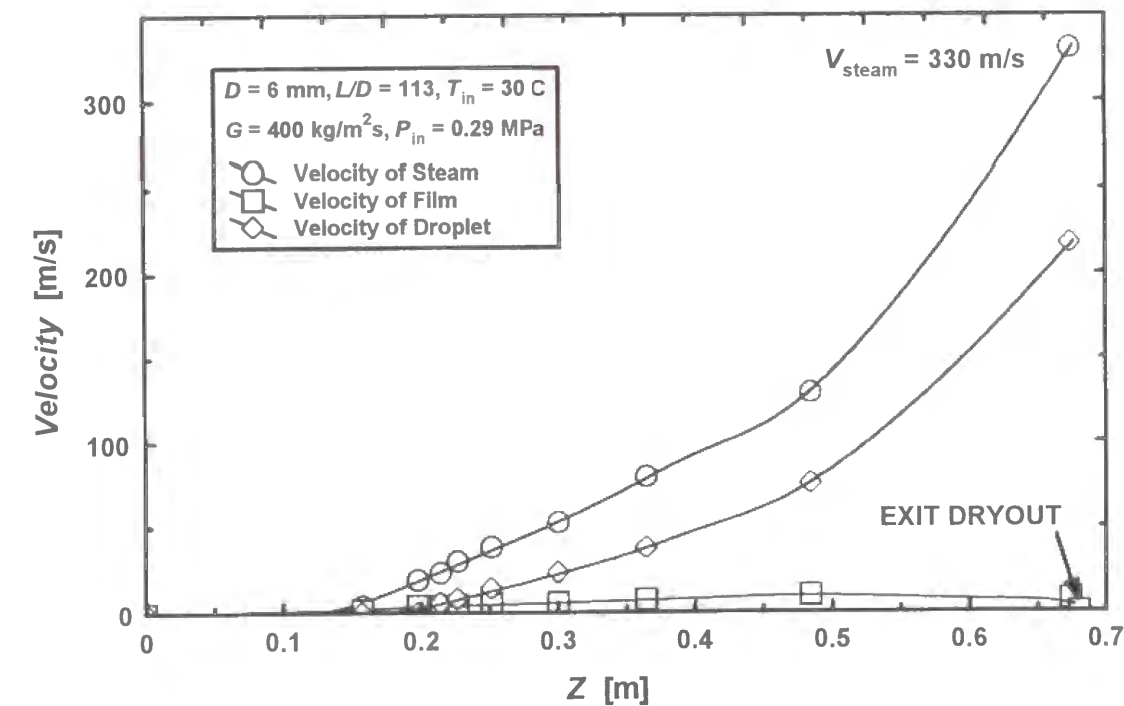


(2) $L/D = 113$

図4.6 FIDASコードによる予測値と実験値の比較

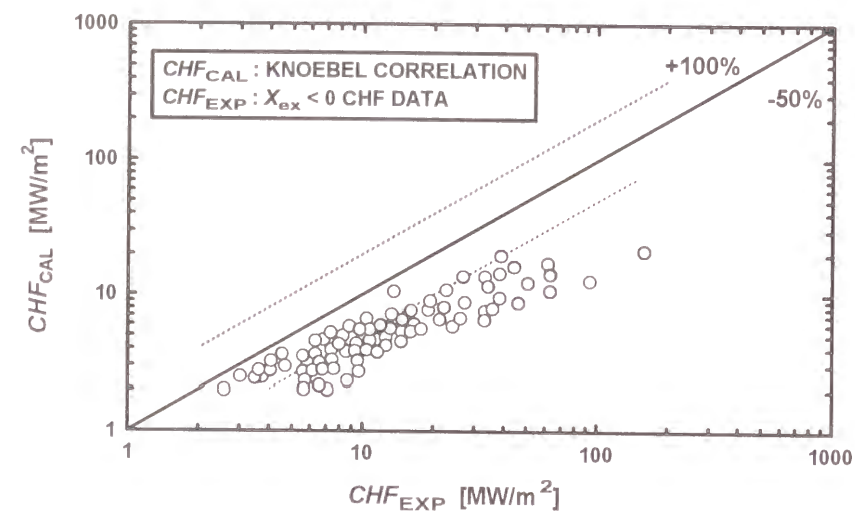


(1) Flow rate of the steam, the film and the droplet calculated by FIDAS code.

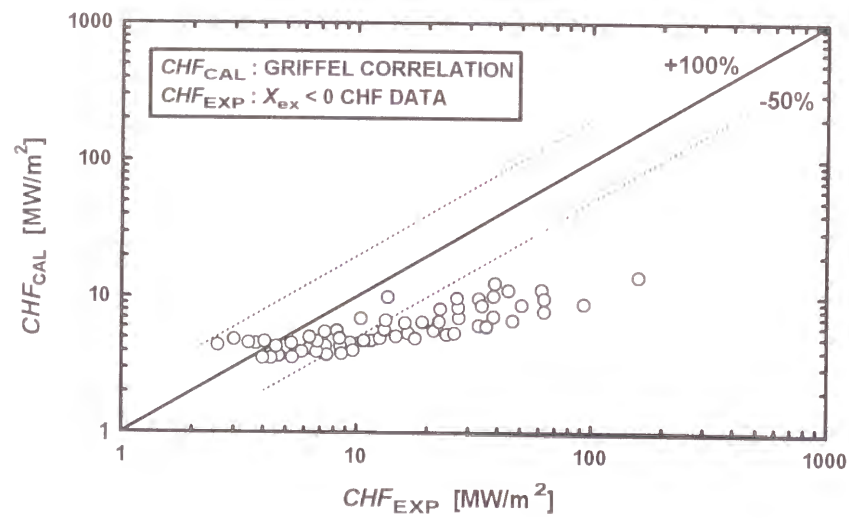


(2) Velocity of the steam, the film and the droplet calculated by FIDAS code.

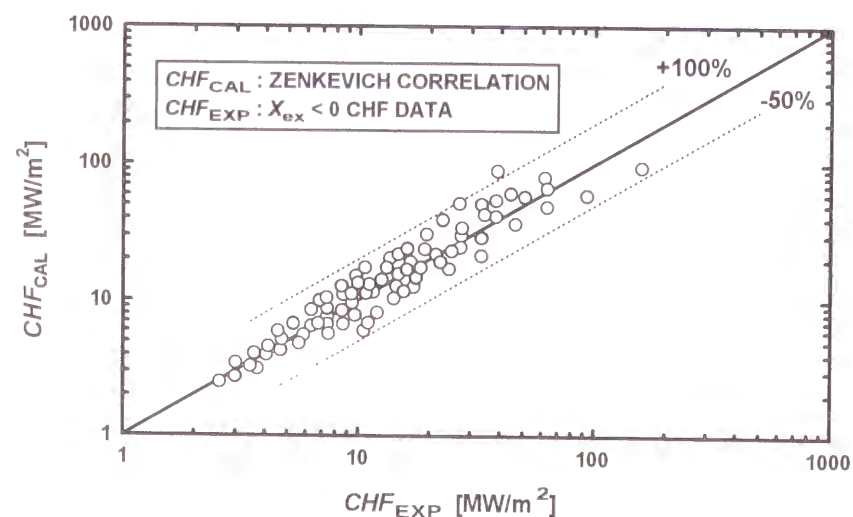
図4.7 FIDASコードによる各相および液滴の流量と速度の流れ方向の解析結果



(1) Knoebel correlation

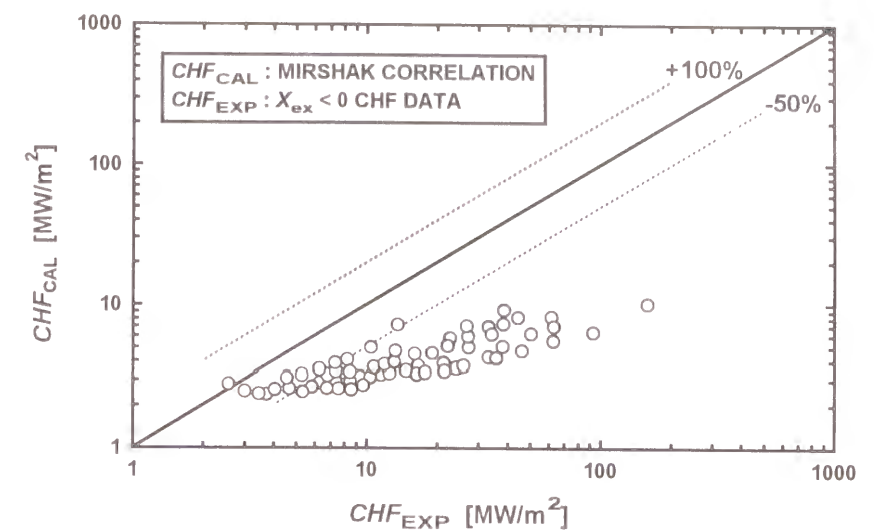


(2) Griffel correlation

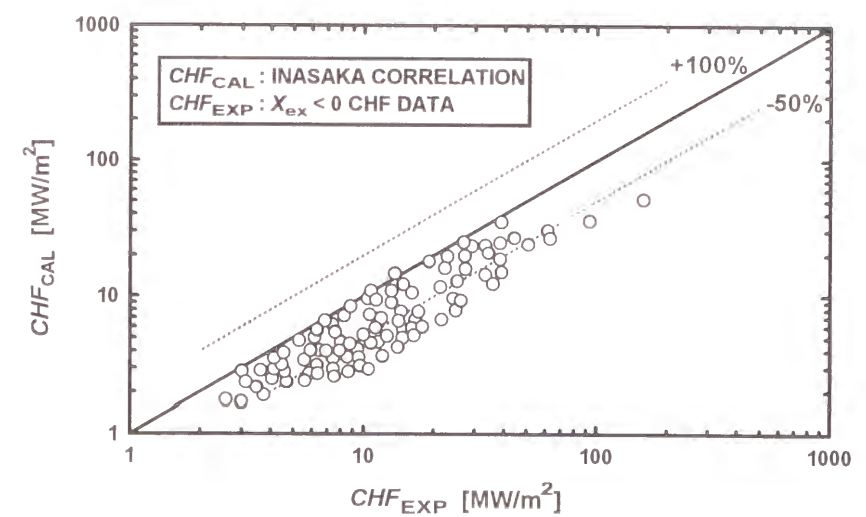


(3) Zenkevich correlation

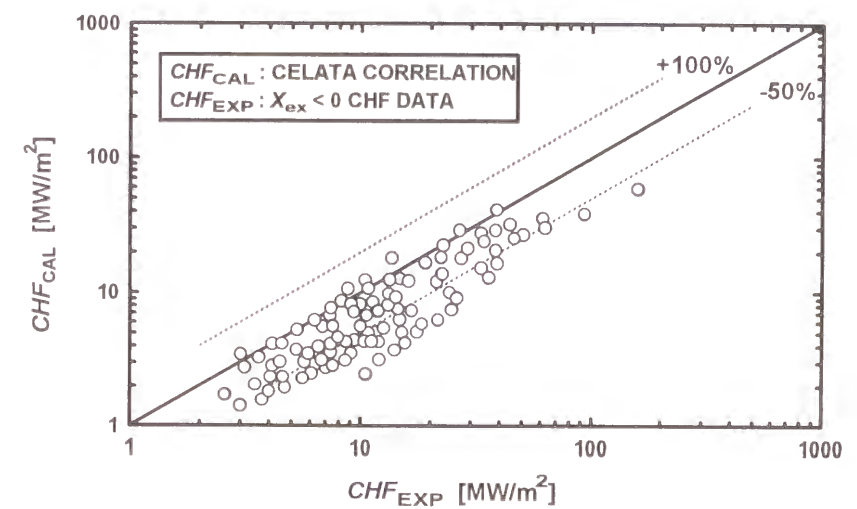
図4.8 DNB型バーンアウト用相関式と実験値の比較



(4) Mirshak correlation

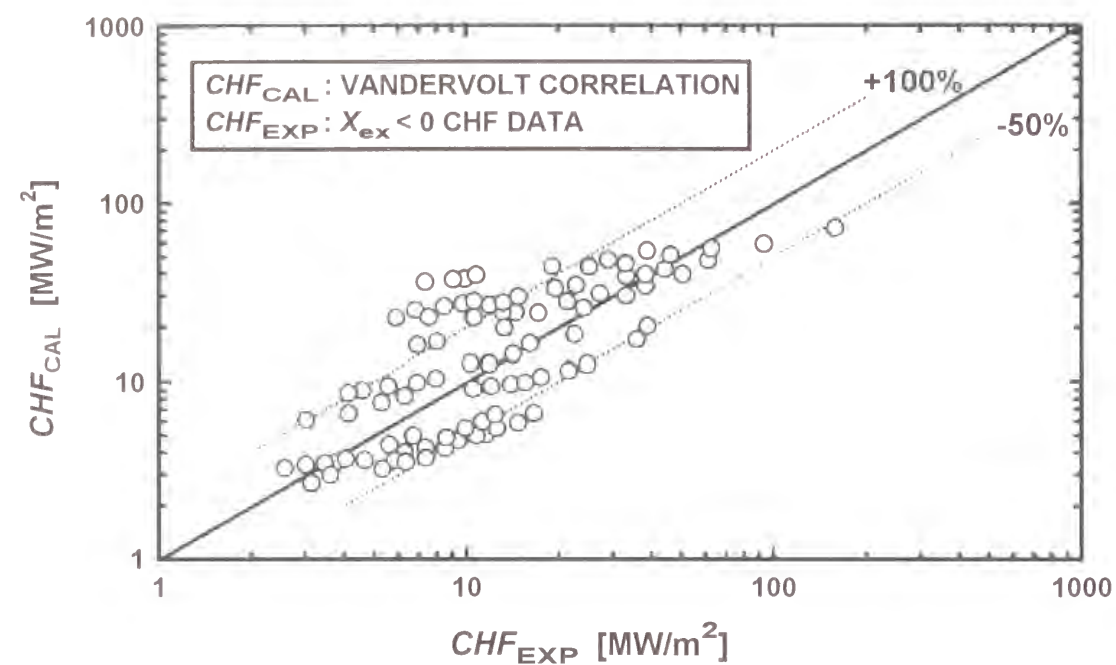


(5) Inasaka correlation

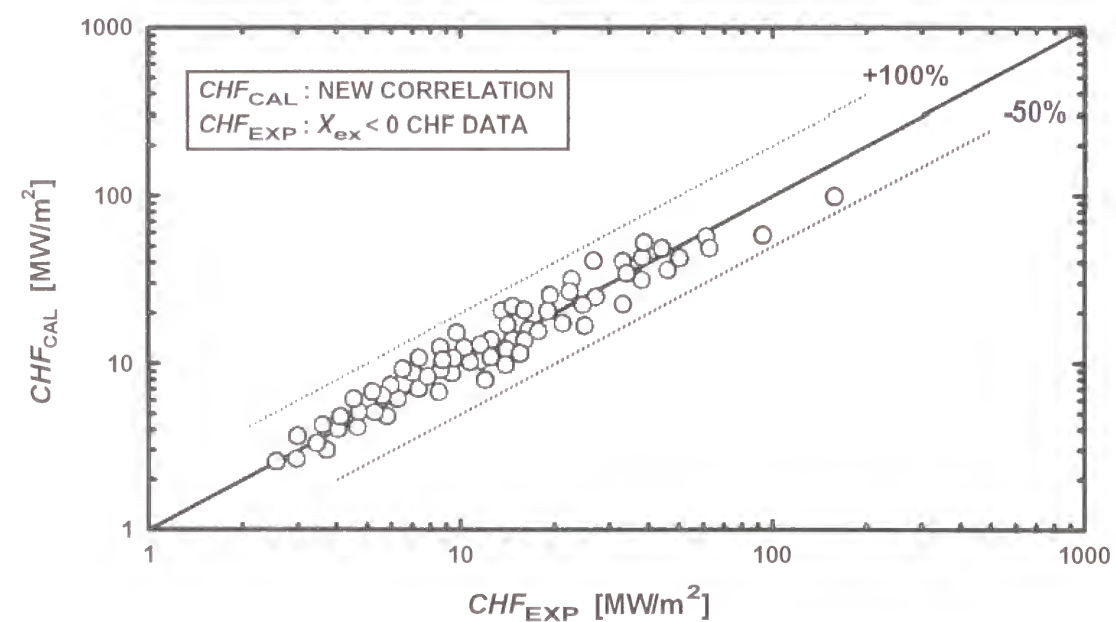


(6) Celata correlation

図4.8 DNB型バーンアウト用相関式と実験値の比較

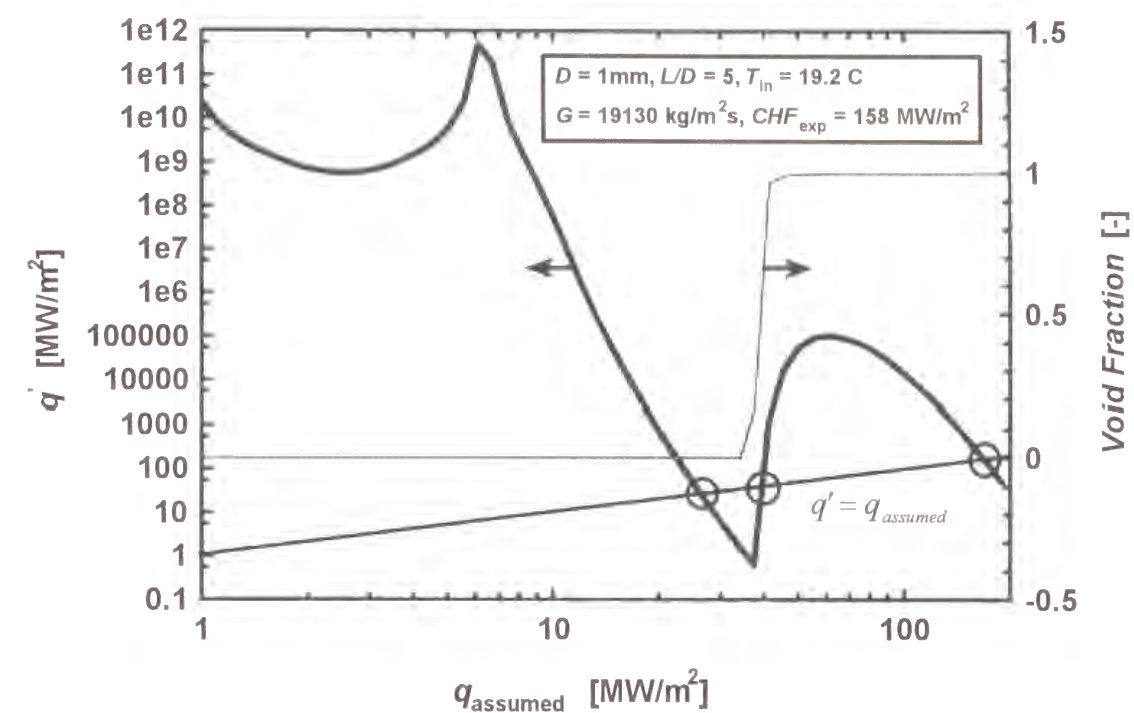


(7) Vandervolt correlation

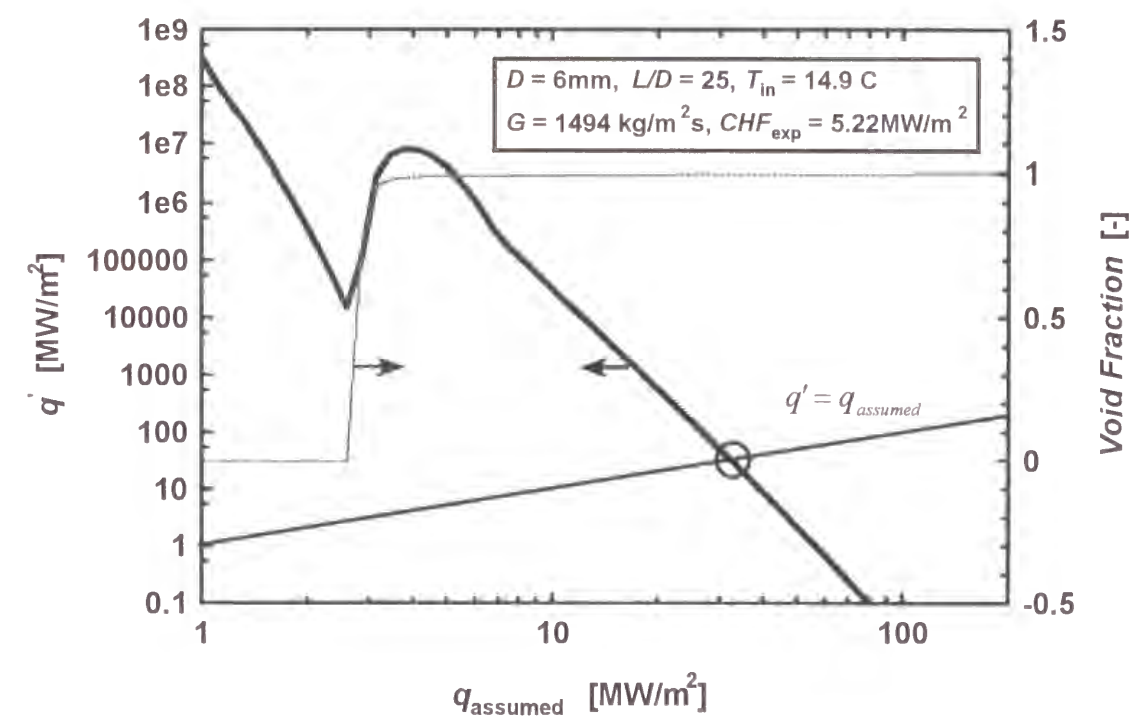


(8) New correlation

図4.8 DNB型バーンアウト用相関式と実験値の比較

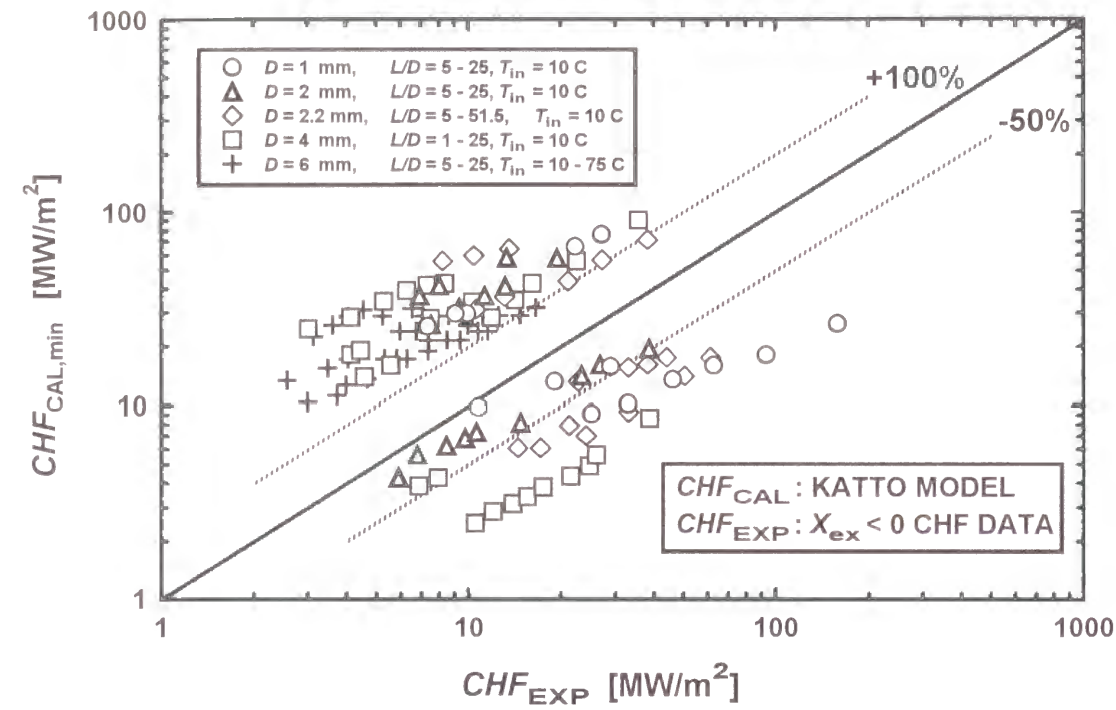


(1) Function of the Katto model (Case 1)

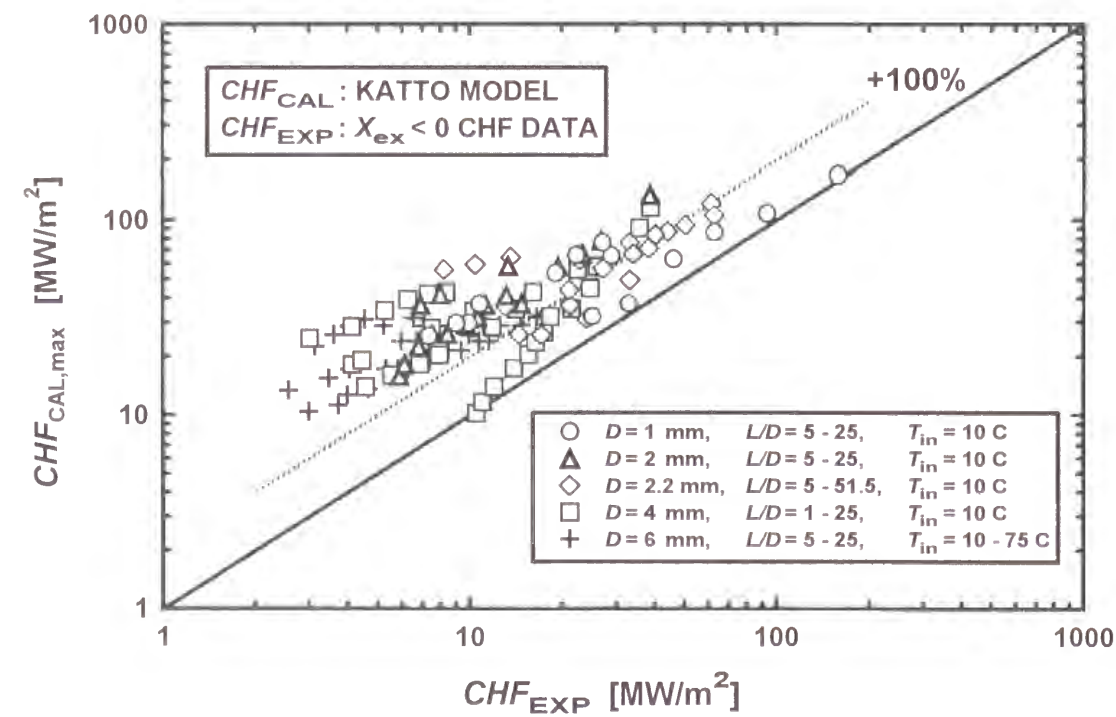


(2) Function of the Katto model (Case 2)

図4.9 Katto モデルの特性関数

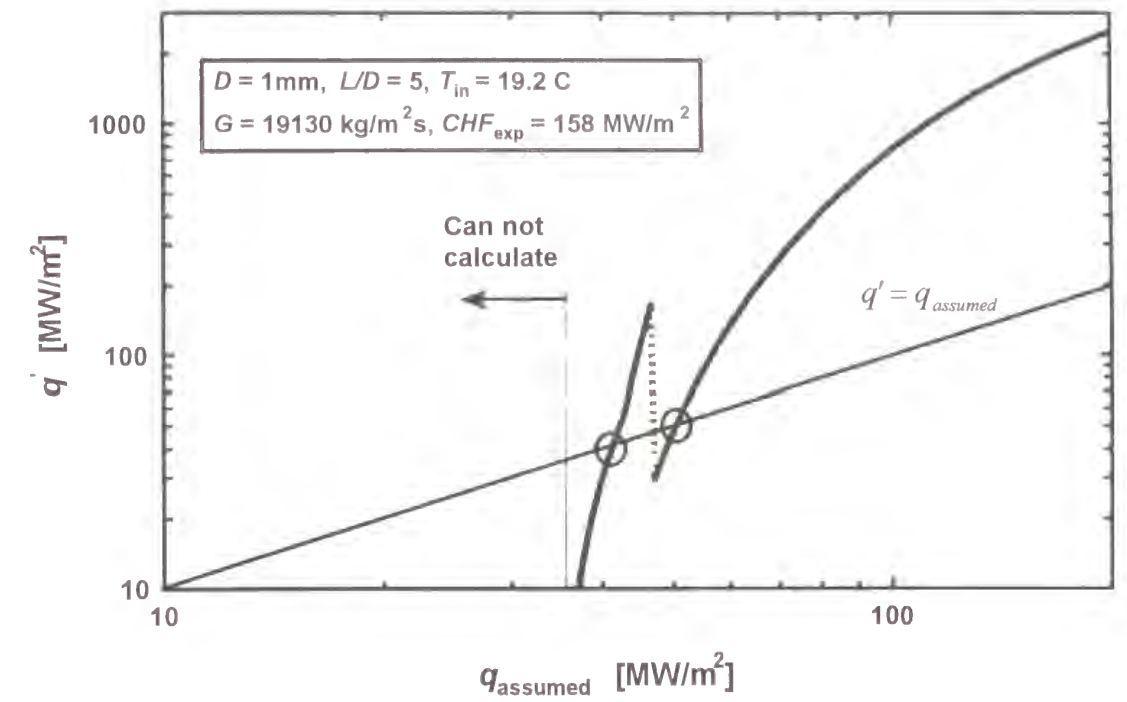


(1) Selected the minimum solution of the Katto model.

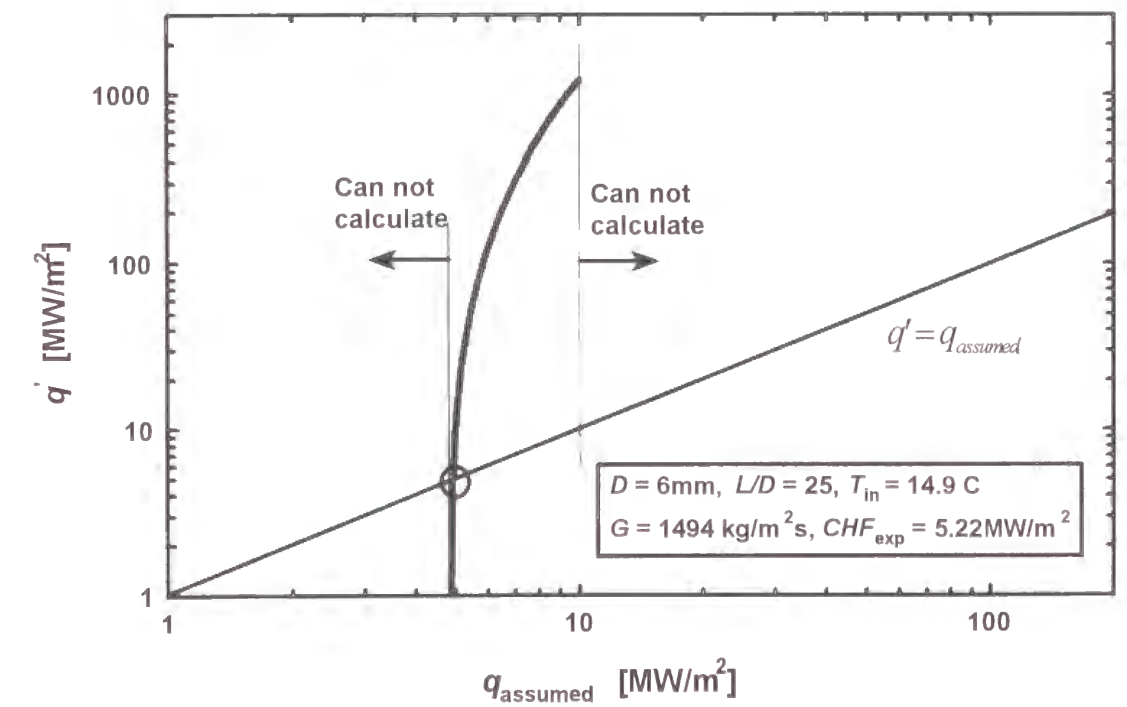


(2) Selected the maximum solution of the Katto model.

図 4. 10 Katto モデルによる予測値と実験値の比較結果

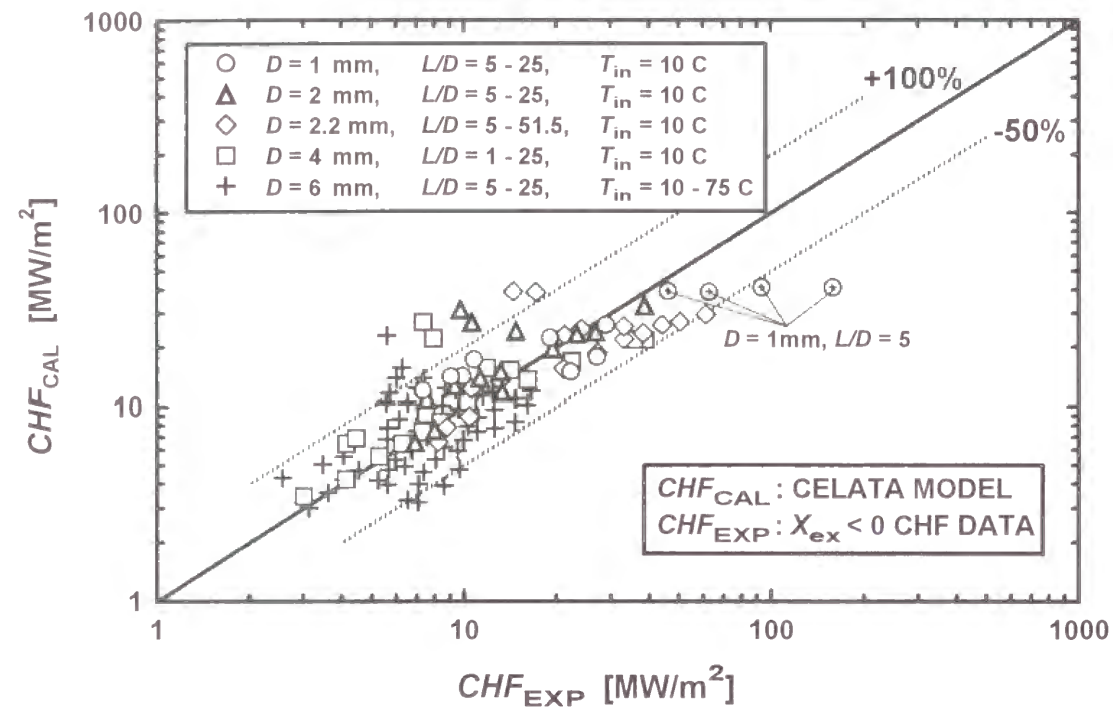


(1) Function of the Celata model (Case 1)

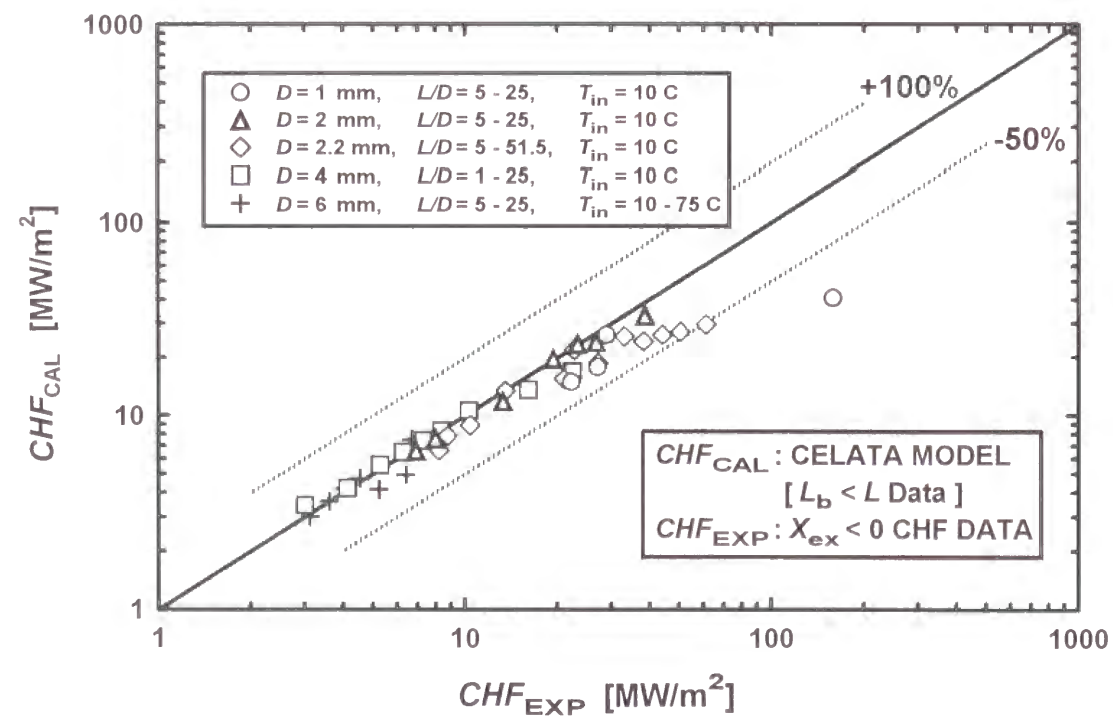


(2) Function of the Celata model (Case 2)

図 4. 11 Celata モデルの特性関数

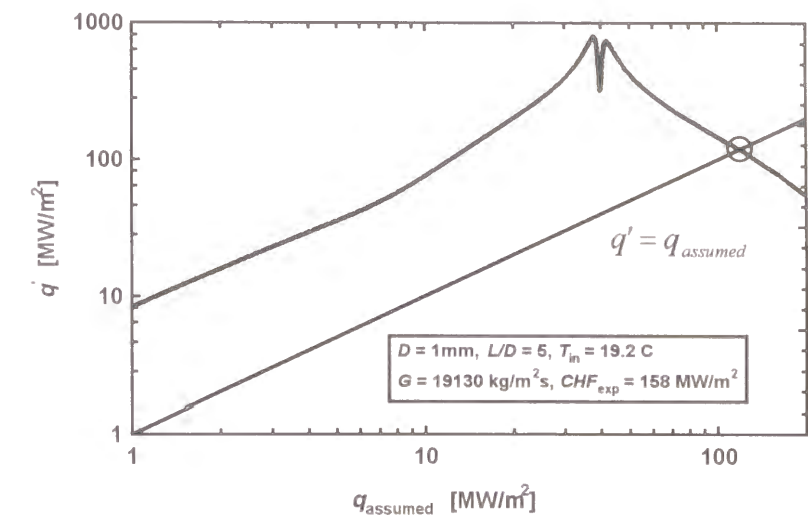


(1) Comparison of the data with the Celata model.

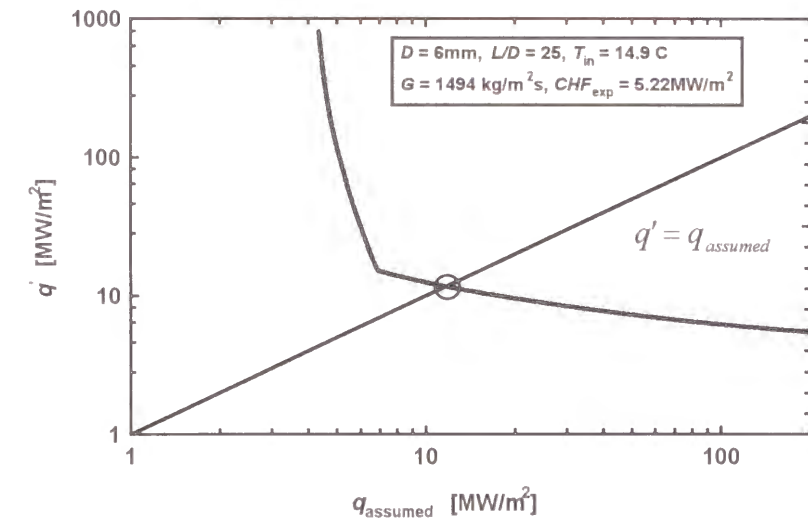


(2) Comparison of the data with the Celata model. ($L_b < L$ Data)

図4. 12 Celataモデルによる予測値と実験値の比較結果



(1) Function of the Weisman-Pei model (Case 1)



(2) Function of the Weisman-Pei model (Case 2)

図4. 13 Weisman-Peiモデルの特性関数

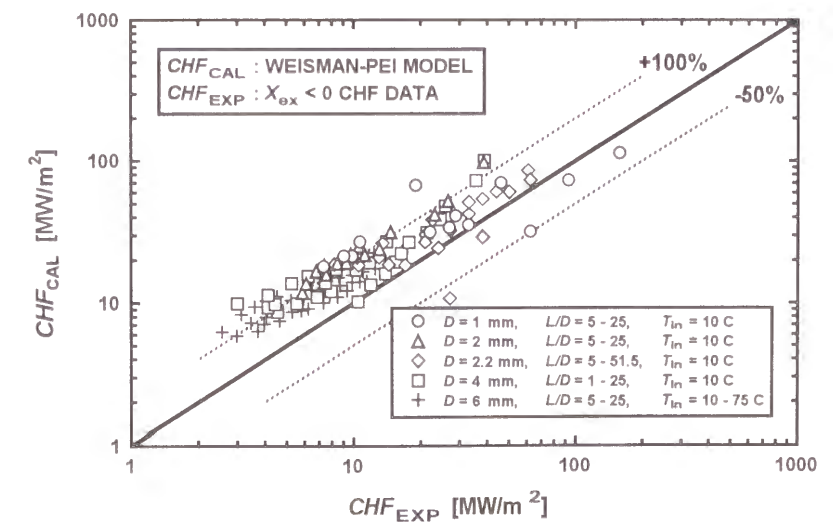
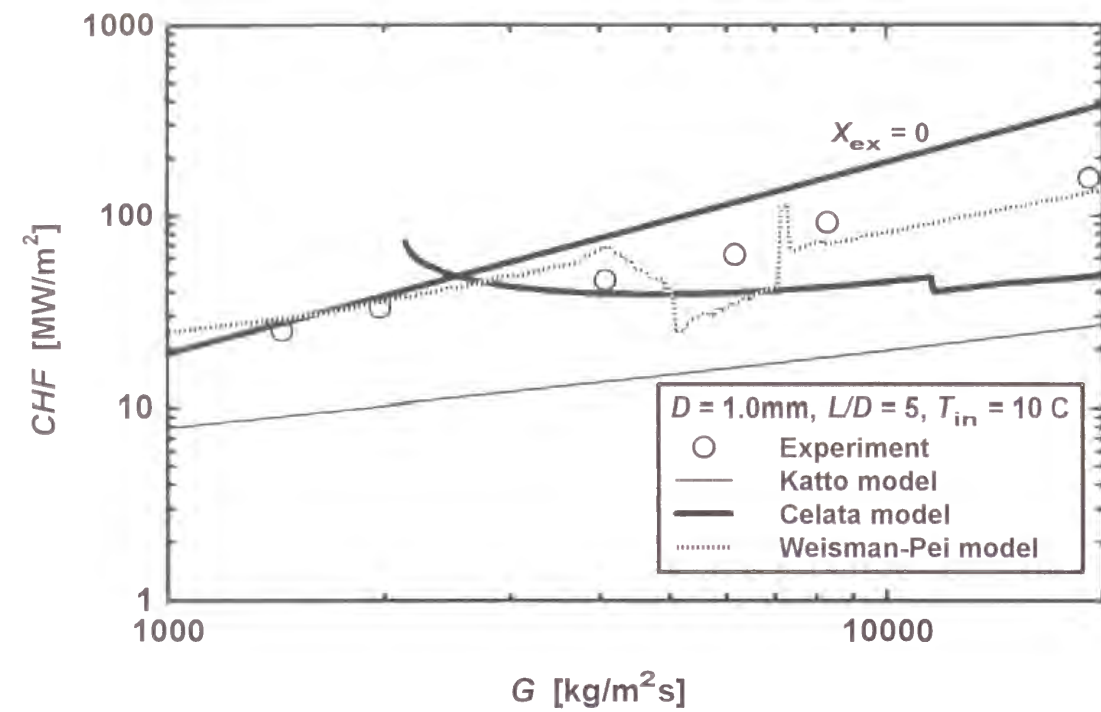
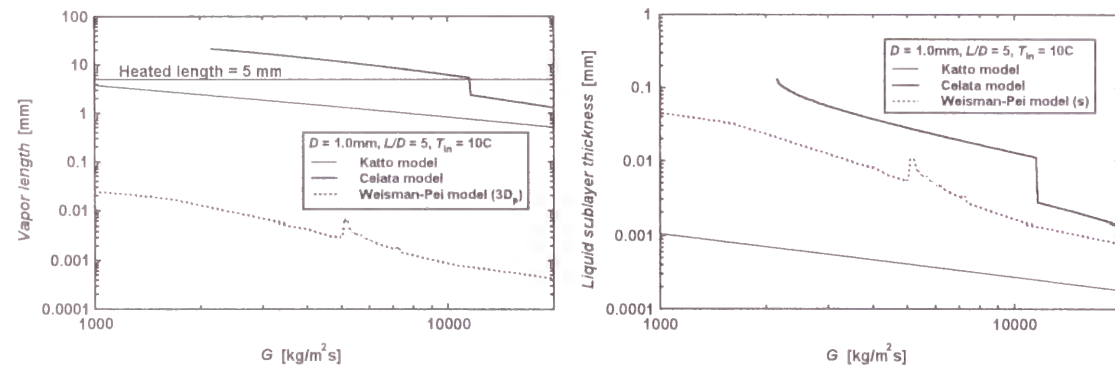


図4. 14 Weisman-Peiモデルによる予測値と実験値の比較結果

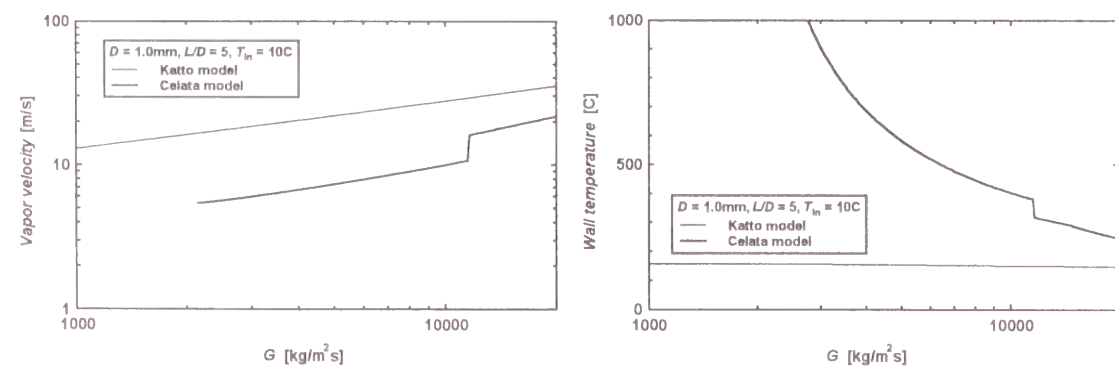


(1) Critical heat flux



(2) Vapor length

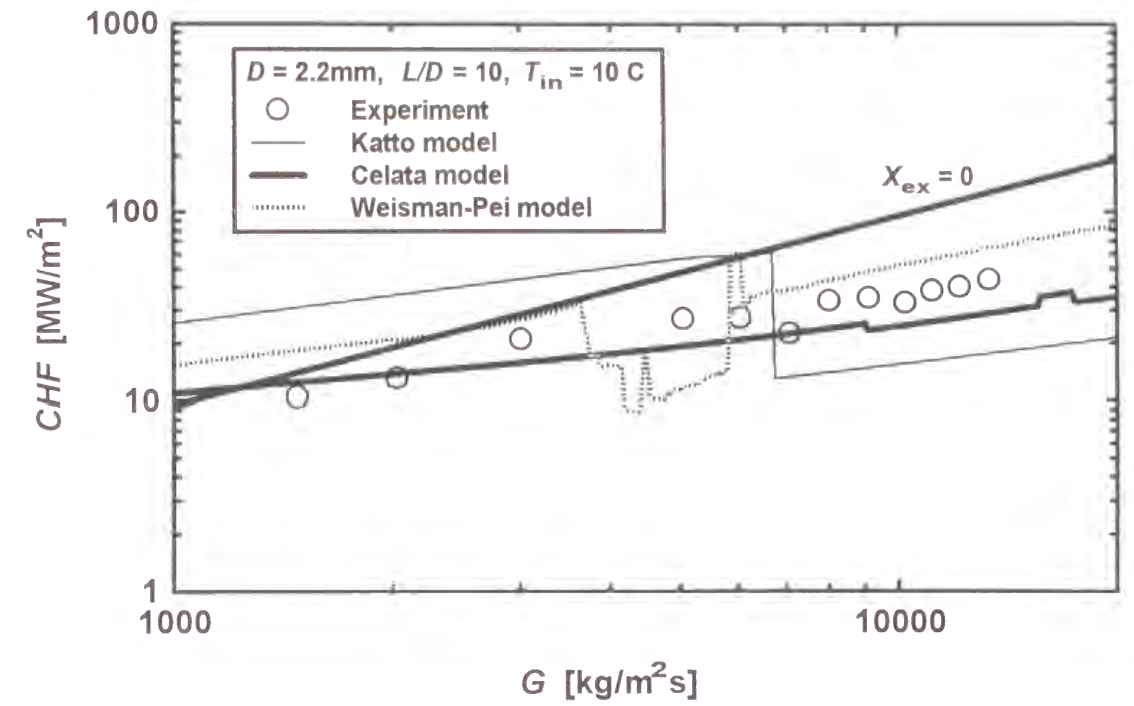
(3) Liquid sublayer thickness



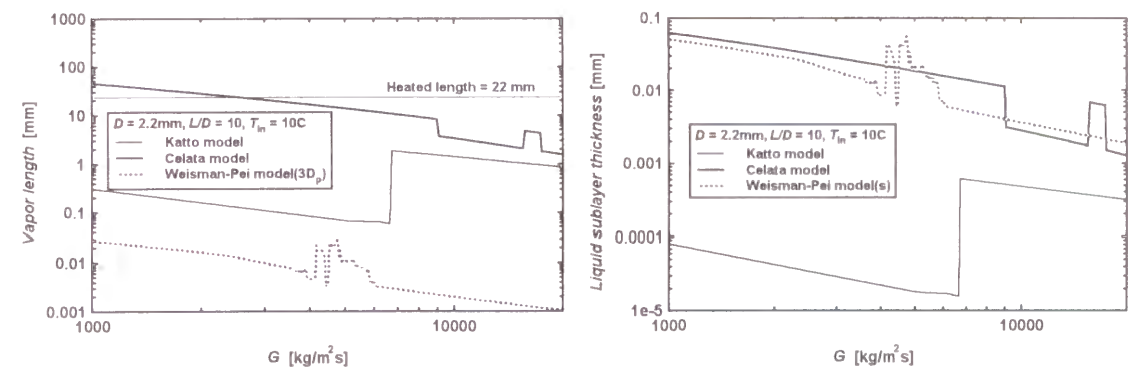
(4) Vapor velocity

(5) Wall temperature

図4. 15 バーンアウト予測モデルの評価 (Case 1)

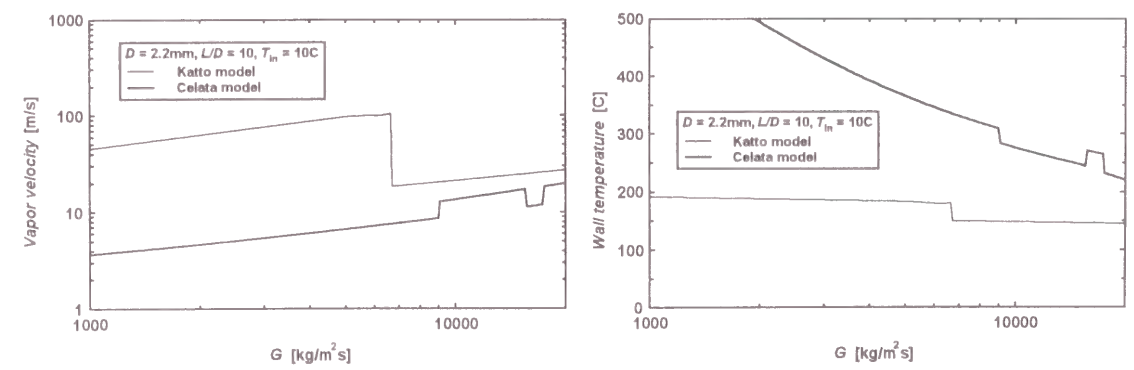


(1) Critical heat flux



(2) Vapor length

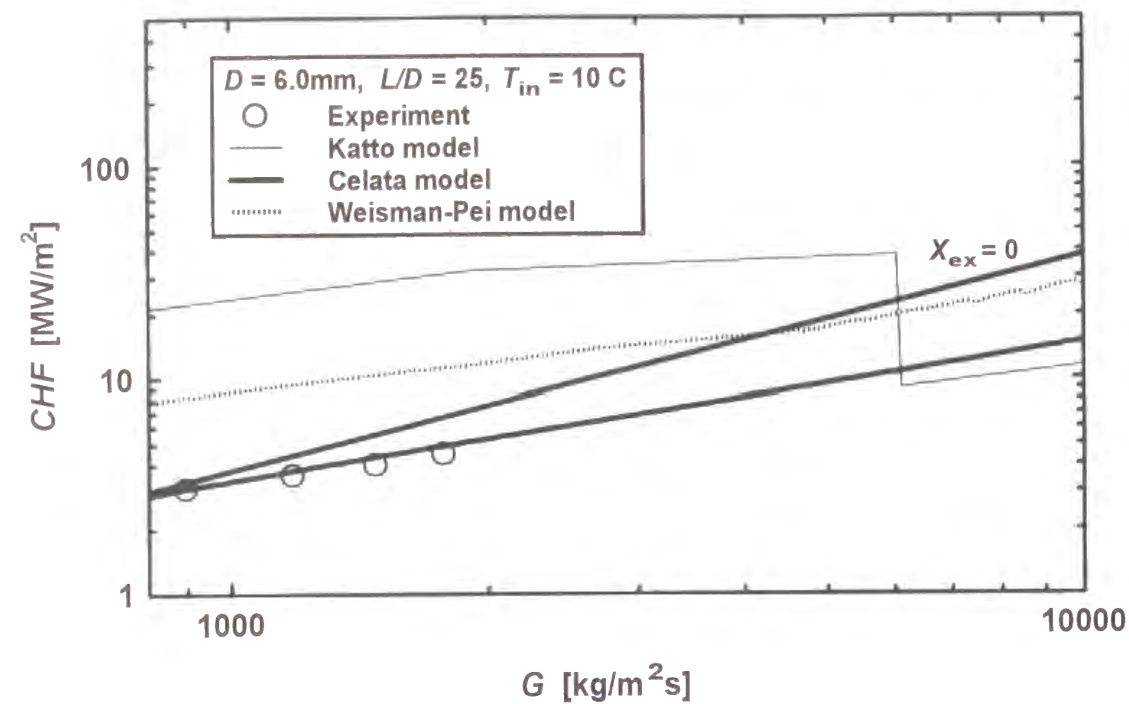
(3) Liquid sublayer thickness



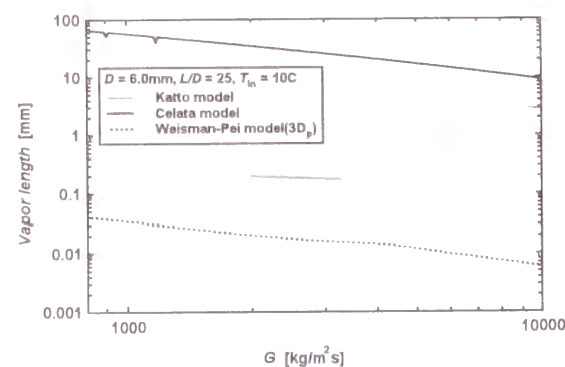
(4) Vapor velocity

(5) Wall temperature

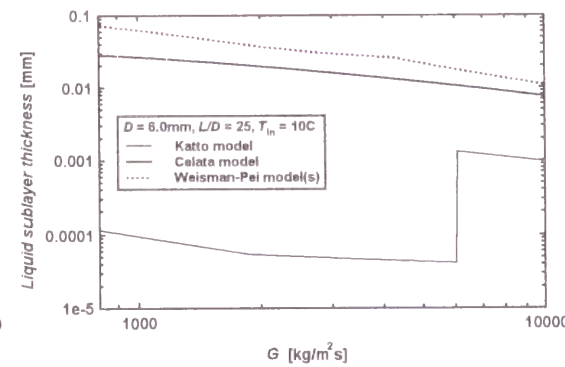
図4. 16 バーンアウト予測モデルの評価 (Case 2)



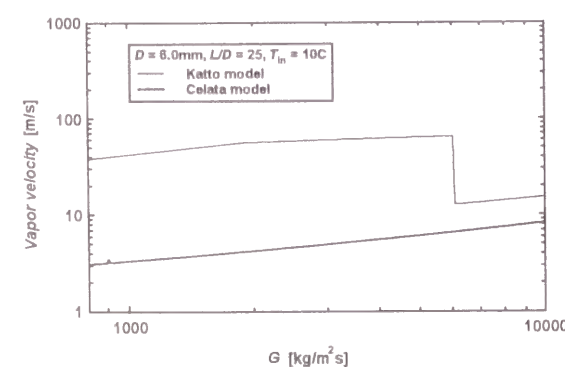
(1) Critical heat flux



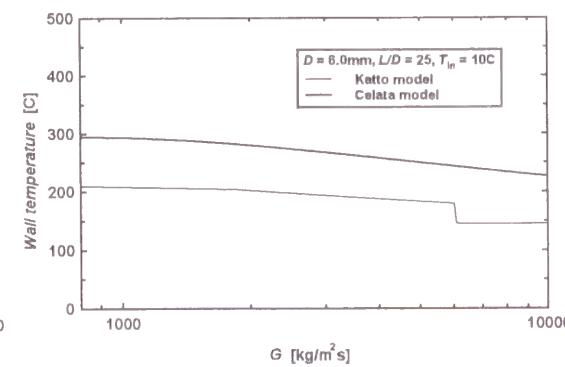
(2) Vapor length



(3) Liquid sublayer thickness

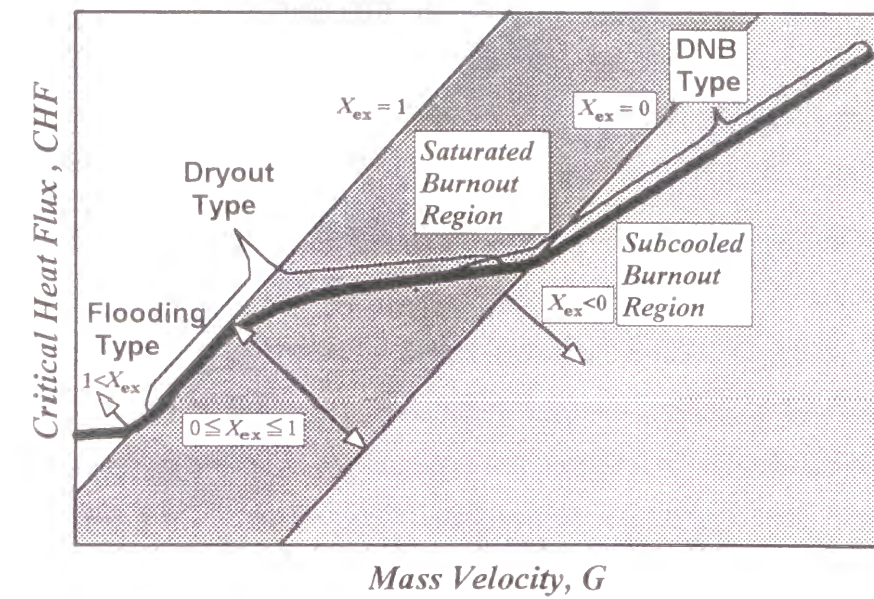


(4) Vapor velocity



(5) Wall temperature

図4. 17 バーンアウト予測モデルの評価 (Case 3)



Predicting CHF for Saturated Burnout Region

Correlation

The CHF due to dryout can be predicted by the Lowdermilk correlation to $D \geq 2\text{mm}$ and $L/D \geq 25$.

Code

FIDAS Code is applicable to $D=6\text{mm}$ and $L/D \geq 50$.

Predicting CHF for Subcooled Burnout Region

Correlation

The CHF due to DNB can be predicted by the following new correlation;

$$Bo = (2.3 - k \cdot X_{ex}) \times 10^{-4} \sqrt{\frac{\sigma}{G \cdot v}}$$

$$k=54 : L > 10\text{mm}, k=93 : L \leq 10\text{mm}$$

Model

The CHF due to DNB can be predicted by the Celata model to $D \geq 1\text{mm}$ and $L/D \geq 25$.

図4. 18 小口径円管内強制流動沸騰バーンアウトの予測計算法

第5章 不安定流動時の小口径円管内沸騰流の熱水力特性

§ 5. 1. 緒言

第2章の実験結果から、大気圧下の小口径円管内強制流動時に圧力降下振動が発生すると限界熱流束値が大幅に低下することがわかった。しかし、現在大気圧下の小口径円管内で発生する不安定流動発生領域や不安定時の熱水力特性を的確に予測する手法が確立されているとは言えない。システムの安全性評価のためには、的確な手法を検討し実験結果と併せて不安定流動時の熱水力特性を解明する必要がある。

そこで本章では、不安定流動時の熱水力挙動を MINI-TRAC コード（秋本；1991）をドライバーコードとして、二流体モデルを基礎とした解析モデルでシミュレーションした。そして、本解析モデルと実験結果を比較し、不安定流動時の熱水力特性に関して検討を行った。特に、限界熱流束の低下と関連し重要な現象である圧力降下振動発生時の熱水力特性をシミュレーションし、従来の均質流モデルやドリフトフラックスモデルでは評価できなかった圧力降下振動時の密度波振動の予測等、より詳細な解析を試みた。そして、圧力降下振動や密度波振動発生領域の解析モデルによる予測の可能性を評価した。

§ 5. 2. 数値解析モデル

数値解析モデルの体系は、実験体系（図2. 25参照）と同様とし、垂直に設置した管内径が6 mmの円管の上流側にサージタンクが接続されている体系をモデル化した。図5. 1に解析モデルのノーディング図を示す。二流体モデルを基礎とした MINI-TRAC コードでは、沸騰体系で空気を同時に扱うことはできない。そこで、本数値解析モデルでは、以下のような仮定をし、シミュレーションを試みた。

（1）サージタンク内の空間を以下の3ノードに分割した。

- ① 気相のみのノード
- ② 気相と液相が共存するノード
- ③ 液相のみのノード

（2）気相のみのノード①内は飽和蒸気で満たされている。そして、サージタンク上面では、質量および熱の移動がないと仮定した。

（3）気相と液相が共存するノード②内では液面の高さをボイド率（正確には気液の体積率）に置き換えた。そして、気液界面では質量および熱の移動がないと仮定した。

（4）試験部出口での圧力は大気圧とした。

（5）入口条件として、ノード7の下の方から系に流入する質量および水温は一定とした。

（6）熱の流入は加熱部内面からあり、その他の部分では熱の流出がないものとした。

§ 5. 3. 構成式の評価

二流体モデルを基礎としたモデルで数値シミュレーションを適切に行うためには、対象となる体系に適した構成式を用いることが重要である。

二流体モデルを構成する構成式は数多く存在する。そこで、どの構成式が結果に及ぼす影響力が大きいのかを知るために感度解析を行った。その結果、壁面摩擦力に関する式と壁面熱伝達率に関する式が結果に及ぼす影響力が大きく、適切な式を用いることが重要であることがわかった。壁面摩擦と壁面熱伝達率に関するモデルの評価を行ったので以下に記す。

5. 3. 1. 壁面摩擦モデルの評価

壁面での摩擦損失係数 f を計算するためのモデルとして均質流モデルと環状流モデルを基とした相関式を考える。以下に均質流モデルと環状流モデルに基づく摩擦損失係数 f の相関式を示す。

均質流モデル

$$f = 0.046 \cdot \text{Re}^{-0.2} \quad ; \text{Re} \geq 5000 \quad (5 \cdot 1)$$

$$f = 0.032 \quad ; \text{Re} \leq 500 \quad (5 \cdot 2)$$

$$f = 0.032 - 5.25 \times 10^{-6} (\text{Re} - 500) \quad ; 500 < \text{Re} < 5000 \quad (5 \cdot 3)$$

ここで、

$$\text{Re} = \frac{\rho_m \cdot V_m \cdot D}{\mu} \quad (5 \cdot 4)$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_f} \quad (5 \cdot 5)$$

ただし、クオリティ X は次式による。

$$x = \frac{1}{1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{\rho_f}{\rho_g}} \quad (5 \cdot 6)$$

環状流モデル

$$f = a + b \cdot \text{Re}^{-c} \quad (5 \cdot 7)$$

但し、

$$a = 0.026 \left(\frac{k}{D} \right)^{0.225} + 0.133 \left(\frac{k}{D} \right) \quad (5 \cdot 8)$$

$$b = 22.0 \left(\frac{k}{D} \right)^{0.44} \quad (5 \cdot 9)$$

$$c = 1.62 \left(\frac{k}{D} \right)^{0.134} \quad (5 \cdot 10)$$

$$k = 5.0 \times 10^{-6} \quad (5 \cdot 11)$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \cdot |V_f| \cdot D}{\mu_f} \quad (5 \cdot 12)$$

式(5・11)で、 k は単相流の場合の管の表面荒さに相当する。環状流では、管表面に付着する液膜の波立ちが粗面管と類似すると考えて、上記の相関式が提唱されている。そして、 k の値は、TRAC-PF1 コード内で、 $k = 5.0 \times 10^{-6}$ (m) が仮定されているので、この値を用いた。

上記の2モデルによる計算値の違いを調べた結果を図5・2に示す。図5・2は、印加

熱流束を 0.8228 MW/m^2 に設定し、50秒毎に質量速度を $958 \text{ kg/m}^2\text{s}$ から $383 \text{ kg/m}^2\text{s}$ へとステップ状に減少させていった場合での計算結果で、加熱部内差圧の変化の様子を示している。比較結果から高流量域では両モデルによる差圧の計算値に顕著な違いは見られないが、低流量域では、環状流モデルに基づく相関式の予測値が高い値を予測することがわかる。秋本らの報告(1991)の中では、環状流モデルによる計算値が実験値より高めとなることが記されている。図5・2の結果は、秋本らの報告と一致している。そこで、試しに均質流モデルを壁面摩擦モデルとして選択し、加熱部内差圧を計算した。この選択の評価は、事項に記す壁面熱伝達率とも関連するので後程記す。

5.3.2. 壁面熱伝達率モデルの評価

壁面からの熱伝達率計算には、液単相強制対流領域には、Dittus - Boelter の式を、核沸騰領域には、Chen の式もしくは下記のように Dittus - Boelter の式に均質流的な重みづけをしたミクスチャモデルを用いて計算を試みた。

ミクスチャモデル

$$h = 0.023 \cdot \frac{k}{D} \cdot \text{Re}_m^{0.8} \cdot \text{Pr}_f^{0.4} \quad (5 \cdot 13)$$

ただし、

$$\text{Re}_m = \frac{G \cdot D}{\mu_m} \quad (5 \cdot 14)$$

$$\mu_m = \left(\frac{x_f}{\mu_g} - \frac{1-x_f}{\mu_f} \right)^{-1} \quad (5 \cdot 15)$$

$$x_f = \frac{\alpha \cdot \rho_g \cdot R_{slip}}{\alpha \cdot \rho_g \cdot R_{slip} + (1-\alpha) \cdot \rho_f} \quad (5 \cdot 16)$$

$$R_{slip} = \left| \frac{V_g}{V_f} \right| \quad (5 \cdot 17)$$

核沸騰領域の熱伝達率計算モデルを評価するために、まず熱流束一定条件下で質量速度を50秒毎に低下させ Chen の式とミクスチャモデルによる熱伝達率の計算値の違いを調べた。この結果を図5. 3に示す。図5. 3から高流量域では Chen の式による熱伝達率の計算値がミクスチャモデルより高く計算されていることがわかる。これら2つのモデルの妥当性を評価するために、実験値と Chen の式およびミクスチャモデルによる計算値を比較した。図5. 4に比較結果の一例を示す。図中の点線は、熱平衡クオリティが0となる位置を示している。ここでは、点線より左側が液単相強制対流領域で、右側が飽和沸騰二相流領域とおおよそ考えることができる。そして、液単相強制対流領域は Dittus - Boelter の式により熱伝達率を計算し、沸騰二相流領域では Chen の式とミクスチャモデルでそれぞれ熱伝達率を計算し実験値とともに示してある。液単相強制対流領域および熱平衡クオリティが0近傍の領域では計算値より実験値の方が高い値となっている。これは、加熱部入口近傍では熱的に未発達なため熱伝達率が高くなるという3章の結果と同様の効果と、液単相流領域でもサブクール気泡が発生し熱伝達率を高める効果、すなわちサブクール核沸騰領域での熱伝達率向上効果の2つの向上効果が働いているためと考えられる。

熱的に十分に発達したと考えられる沸騰二相流領域の実験値と計算値を比較すると、ミクスチャモデルによる計算値が実験値と近い値となっていることがわかる。この結果から、本体系には、Chen の式よりミクスチャモデルによる熱伝達率計算の方が適していると考えられる。

以上のように、均質流モデルを基とした相関式により壁面摩擦力を計算し、ミクスチャモデルにより壁面熱伝達率を計算するとした解析モデルの評価を行うために、サージタンクを接続しない安定流動時の圧力損失測定実験の実験結果と比較を行った。図5. 5に実験値と計算値をそれぞれ示す。図5. 5から熱流束が0. 56 MW/m²では計算値は実験値より高い値を示すが、0. 823 MW/m²以上では、実験値とよく一致していることがわかる。この比較結果から、本体系では、壁面摩擦と壁面熱伝達率の計算に均質流モデルを基とした相関式を用いた計算値と実験値との誤差が小さい事が確認された。

§ 5. 4. 数値解析結果と実験結果の比較

数値解析結果を実験結果と比較できるように、第2章の不安定流動実験と同様な入力用データセットを作成した。そして、流量が一定で熱流束が上昇する場合（CASE 1）と、熱流束が一定で流量が低下する場合（CASE 2）の2通りで不安定時の熱水力特性を計算した。

5. 4. 1. 熱流束上昇に伴う不安定流動現象の数値解析結果と評価

図5. 6に圧縮性空間の体積を4. 16リットルに設定し、CASE 1で数値解析を行った結果を実験結果と共に示す。図5. 6の上半分には、加熱部内差圧と加熱部出口の壁面温度の測定値を、下半分には同様に差圧と壁面温度の計算値を示してある。

実験結果から、圧力降下振動がある印加熱流束以上から現れはじめ、印加熱流束が増す毎に振動の周期が長くなり振幅が大きくなることがわかる。そして、圧力降下振動発生時には密度波振動が常に併発していることがわかる。この密度波振動の併発する点が従来の均質流モデルやドリフトフラックスモデルでは計算できなかった。解析結果と実験結果を比較する前に、圧力降下振動発生時の密度波振動の特性について考えてみることにする。

Ishii - Zuber（1970）により高压下のシステム内で発生する密度波振動の条件が報告されている。その報告では、密度波振動の発生する蒸気クオリティに下限があり、一定値以上のクオリティで密度波振動が発生すると報告されている。

Kakac（1976）は、 $\Delta P - G$ カーブ上で $d\Delta P/dG$ が正となる二相流領域で密度波振動が発生することを報告している。一方圧力降下振動は、図5. 7に示すように $\Delta P - G$ カーブ上に $d\Delta P/dG$ が負となる二相流領域が存在する条件で発生することが知られている。圧力降下振動は、図5. 7上で、A-B-C-D-E-A の順で変動を繰り返す。A-B 上では加熱部内は液相で満たされているために密度波振動は発生せず、 ΔP が低下する。図5. 6の実験結果の（c）では、二箇所密度波振動が消え、 ΔP が低下している領域が確認できるが、この領域が図5. 7の A-B に対応している。この時、加熱管内が液相であるため壁面温度が低下してゆくことが実験結果から確認できる。次に現象は B-C へと遷移する。この遷移の途中から密度波振動の発生が見られ、壁温が上昇を始め、C 点で ΔP が最小値となる。そして、現象は C-D へと移行する。この移行時は蒸気相が加熱管内を占める割合が高く、 $\Delta P - G$ カーブ上で $d\Delta P/dG$ が正となる沸騰二相流であるため、密度波振動が併発する。このとき加熱部に流入する質量速度は低下しており壁温は上昇する。最後に現象は D-E-A へと遷移する。この遷移により液が加熱部内に急激に流入するため、密度波振動を伴いながら壁温は急下降する。

以上のように圧力降下振動発生時には密度波振動が併発し、壁温振動を繰り返すことが実験結果から分かっている。

次に数値解析モデルによる計算値と実験値を比較し、評価を行ったので以下に記す。

ΔP の変動を比較すると、圧力降下振動の基本波形は両者共に一致していることがわか

る。このことから、当解析モデルにより圧力降下振動の基本振動が計算可能であることが確認できた。また、圧力降下振動発生時に併発する密度波振動の実験結果との対応をみると、定性的に実験値とよく一致しており、従来報告されていない数値解析による圧力降下振動時の密度波振動の計算が可能であることが確認できた。しかし、定量的には、少し振幅を大きめに計算する傾向がある。

壁温振動の計算値を実験値と比較すると定性的には一致しているといえよう。実験では、加熱部の熱容量や液滴の影響が考えられ同一条件でも熱流束上昇直後は壁温の変動波形が一定していなかった。数値解析でも波形が不揃いとなるのは、数値が安定するまで時間を要することが原因であると考えられる。

壁温変動を適切に予測することが工学的に重要であるので、加熱部出入口間の差圧の変動と壁温変動に関して解析結果と実験結果をより詳しく比較してみた。実験では、差圧の記録はチャート紙に記録されている。この記録と本数値解析モデルによる差圧変動の計算結果が良く一致しているケースを探し、その条件での数値解析結果をもとにパワースペクトル密度と振動周期の関係を調べた一例を図5. 8に示す。短周期でのピークが密度波振動によるもので、長周期でのピークが圧力降下振動の基本波形によるものである。このように、実験値と計算値の圧力降下振動の周期を調べ、それぞれを比較した結果を図5. 9に示す。

図5. 9から、実験値と計算値の傾向はよく一致していることがわかる。定量的には、熱流束が高くなるほど、計算値と実験値の周期に違いが広がり、最大で10秒程度の誤差を生じている。

5. 4. 2. 流量低下に伴う不安定流動現象の数値解析結果と評価

図5. 10に圧縮性空間を0.66リットルに設定し、CASE2で数値解析を行った結果を実験結果と共に示す。図5. 10は、サージタンク上端の圧力変動と加熱部内差圧を示しており、左に実験値を、右に計算値をそれぞれ示している。

実験結果から、圧力降下振動がある質量速度以下でしか発生せず、質量速度の低下と共に振動の周期が長くなり振幅が大きくなることがわかる。そして、この圧力降下振動発生時にはサージタンク上端圧力が、加熱部内差圧と逆の位相で大きく振動している。さらに(c)まで質量速度が低下すると圧力降下振動は消え、短周期の密度波振動のみの現象に連続的に移行している。そして、圧力降下振動が消えた時点で、サージタンク上端圧力の振動がみられなくなる。

図5. 10の示した解析結果を実験結果と比較すると、圧力降下振動と密度波振動の併発する現象を実験結果と同様に計算できていることがわかった。また、圧力降下振動の大きさは圧縮性空間が大きいほど大きく、振動の周期が長くなることが実験結果からわかっているが、図5. 6と図5. 10の比較やその他の比較結果から、この特性を本解析モデルにより計算できることがわかった。

5. 4. 3. 不安定流動発生領域の予測と評価

図5. 10から実験と同様に圧力降下振動が発生しはじめる条件や密度波振動のみに移行する境界がわかる。このようにCASE2の方法で解析を幾通りも行い、不安定流動発生境界を調べ、実験結果と比較を行った。図5. 11に、実験で分かった不安定流動発生領域と解析結果から不安定流動の発生が確認できた点をそれぞれ示す。図5. 11中の×は解析結果から圧力降下振動(PDO)の発生が確認された点を示しており、△は実験による圧力降下振動発生限界点を示している。図5. 11から解析結果と実験結果は同じ領域で圧力降下振動発生領域を示しており、本解析により不安定流動発生領域の予測ができることが確認できた。そして、高熱流束域では、壁温が高温となり計算値が発散する点が、実験によるバーンアウト発生点と定性的に一致しており、実験と同様に圧力降下振動発生領域の上限値を決定できなかった。また、低流量域や低熱流束域で圧力降下振動の発生領域に下限が存在する。この下限の存在は解析結果からもわかり、これは $\Delta P - G$ カーブ上から $d\Delta P/dG$ が負となる領域が無くなったため、解析結果も実験結果同様に密度波振動による振動のみを示していた。

§ 5. 5. 不安定流動発生時の熱水力挙動に関する考察

第2章に記した不安定流動実験から、本実験条件では出口クオリティが0以上の低クオリティ領域で圧力降下振動が発生する領域が存在することが分かっている。この不安定流動を本章では数値解析により計算し、不安定流動発生領域の予測、及び熱水力特性の予測が可能であることを示した。ここでは、不安定流動発生領域での流体の挙動およびCHFに関して、実験結果及び解析結果を基に考察することにする。

不安定流動とCHFの関係を考察するに当たり、以下のように8通りのケースに分類し、それぞれのケースの特徴を以下に記す。

(a) CASE1、低流量、圧縮性空間が大きい場合

- (b) CASE 1、低流量、圧縮性空間が小さい場合
- (c) CASE 1、高流量、圧縮性空間が大きい場合
- (d) CASE 1、高流量、圧縮性空間が小さい場合
- (e) CASE 2、低熱流束、圧縮性空間が大きい場合
- (f) CASE 2、低熱流束、圧縮性空間が小さい場合
- (g) CASE 2、高熱流束、圧縮性空間が大きい場合
- (h) CASE 2、高熱流束、圧縮性空間が小さい場合

(a) CASE 1、低流量、圧縮性空間が大きい場合

上記の8通りのケース中最もCHFが低下する割合が大きいケースである。熱流束が上昇し、不安定流動発生領域に入るとサージタンクと加熱管の間で圧力降下振動による流体の振動が発生する。そして、熱流束の上昇と共に流体の振動周期が増し、流体の移動流量も増加する。このとき数値解析によると加熱部出口端でのボイド率は0から1近傍まで変動しており、サージタンクに流体が流入するとき時には、加熱管内のほとんどが蒸気となる。このため壁温振動が顕著となり、定常時のCHFと比較し50%以下の低いCHF値でバーンアウトに至る。

(b) CASE 1、低流量、圧縮性空間が小さい場合

圧縮性空間が小さい場合には、不安定流動発生領域内での流体の振動周期は短く、移動流量も小さい。このため壁温の振動幅も小さい。振動は、圧力降下振動発生領域の上限熱流束で最も激しくなる。しかし、この上限を超えると現象は密度波振動のみに変わり、サージタンクへの流体の移動流量は低下する。そして、バーンアウトは安定流動時の値に近い値で発生する。

(c) CASE 1、高流量、圧縮性空間が大きい場合

例えば図5.5の $G=2000\text{ kg/m}^2\text{ s}$ の場合、図5.6上のB点に相当する。このとき図2.32から分かるように q は 1 MW/m^2 を超える熱流束となる。この印加熱流束が $X_{ex} > 0$ となる条件を満たすと、図5.6上のB-Cの負の勾配領域となり、C点に向かう不安定流動が生ずる。このとき加熱部内のボイド率は増加し、サージタンクへ流体が一気に流入する。圧縮性空間の体積が大きいと、加熱部出口端でのボイド率はほぼ1となり、熱流束が高いため出口の液膜が消滅しバーンアウトに至る。このため振動には至らず、加熱部へ流入する流体の流量が急激に低下し発生する

流量逸走型のバーンアウトになる。

(d) CASE 1、高流量、圧縮性空間が小さい場合

熱流束が不安定流動発生領域に入っても、圧縮性空間が小さいためサージタンクへの液の流入量が小さく、周期の短い振動が発生する。しかし、壁温は振動により高い値にまで上昇し、圧力降下振動発生領域の上限熱流束近傍ではバーンアウトに至る。

(e) CASE 2、低熱流束、圧縮性空間が大きい場合

流量が低下し不安定流動発生領域に入った場合、(a)の場合と同様な現象となる。流量の低下と共に振動の周期が増し、(a)と同じく安定流動時のCHFに対して50%以下の低いCHF値でバーンアウトに至る。

(f) CASE 2、低熱流束、圧縮性空間が小さい場合

不安定流動発生領域においても振動の周期は短く、壁温の振動幅は小さい。バーンアウトに至るまで壁温の大きな急上昇は起こらない。不安定性は、圧力降下振動発生領域の低流量端で最大となり、このときサージタンクとの流体の移動量が多く、壁温の振動幅が最大となる。しかし、系へ流入する流量が低流量端以下の流量まで低下すると密度波振動のみの比較的安定した流れとなる。CHF値は、高クオリティ領域の安定流動時の値と等しく、圧縮性空間のCHFに及ぼす影響は最も小さい。

(g) CASE 2、高熱流束、圧縮性空間が大きい場合

(c)の場合と同様な現象となり、流量低下のため不安定流動発生領域に入ると流量逸走型のバーンアウトが発生する。このためCHF値は、出口クオリティが0となる値近くまで低下する。

(h) CASE 2、高熱流束、圧縮性空間が小さい場合

(d)の場合と類似しており、流量の低下と共に振動の周期および振幅が増す。バーンアウトは、圧力降下振動発生領域の低流量端近傍で発生する。

§ 5. 6. 結言

本章において、小口径円管内での不安定流動を二流体モデルで数値解析し、解析結果と実

験結果とを比較し評価を行った。また、実験結果と解析結果を基に不安流動時の熱水力挙動を考察した。

本来、MINI-TRAC コードを構成する構成式の多くが高圧力用のものであり、低圧力条件下での適用性に関しては評価がなされていなかった。また、圧縮性空間を上流に持つ加熱管内での不安定流動を数値解析で行った例はなかった。本章では、簡単な数値解析モデルにより、密度波振動や壁温振動を併発する圧力降下振動を解析した。解析は実験条件を入力条件とし、解析結果は実験結果と比較し評価した。まず、静圧力損失特性の解析値と実験値が良く一致することを確認した後、圧力降下振動、密度波振動、壁温振動を計算し、実験データと比較し検討を行った。検討の結果を以下に示す。

- (1) 二流体モデルを基礎とした解析モデルにより、大気圧下の小口径円管内不安定流動実験の結果と同様な解析結果を得ることができた。
- (2) 壁面熱伝達率の計算には、Chen の式よりミクスチャモデルを用いた方が適切な計算がなされる。
- (3) 密度波振動や壁面温度振動を伴う圧力降下振動発生領域を解析モデルから予測した結果、実験結果に近い領域を予測できた。

本解析により圧力降下振動および発生領域が計算でき、実験からは得られなかった情報と実験結果から、大気圧下の小口径円管内で生ずる不安定流動時の熱水力特性を明らかにした。

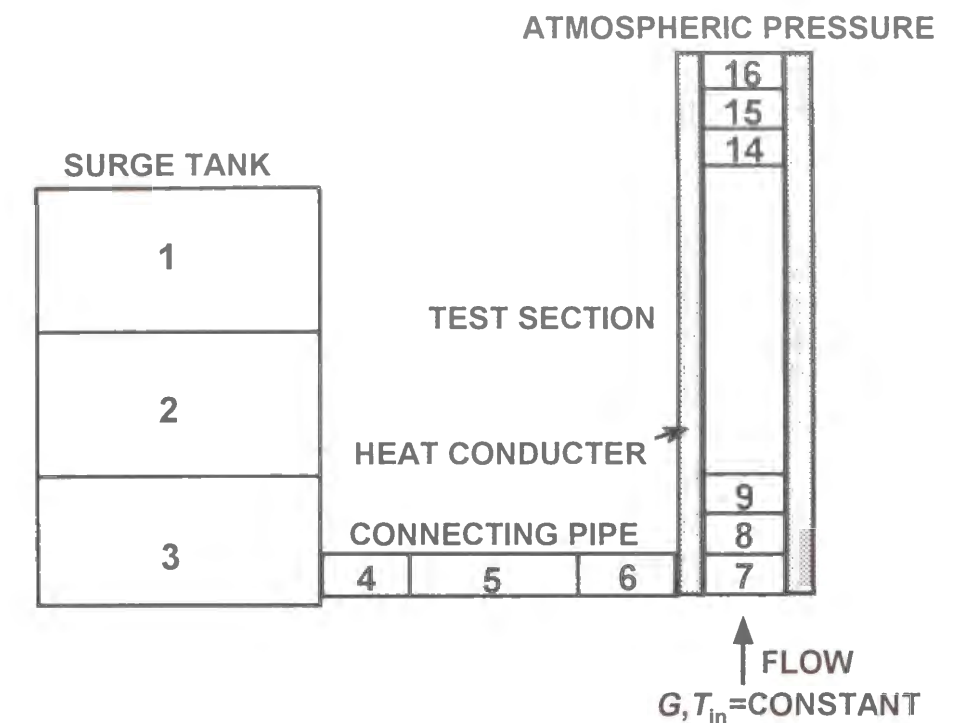


図5. 1 数値解析モデルのノーディング図

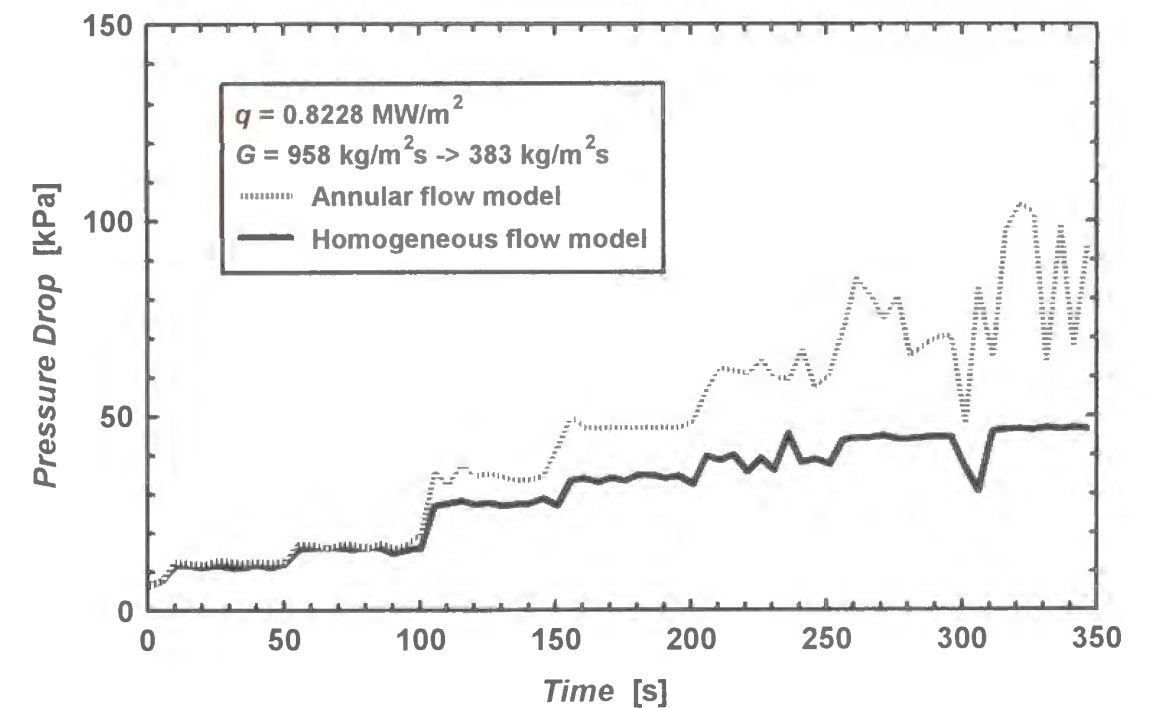


図5. 2 均質流モデルと環状流モデルによる加熱部内差圧の計算例

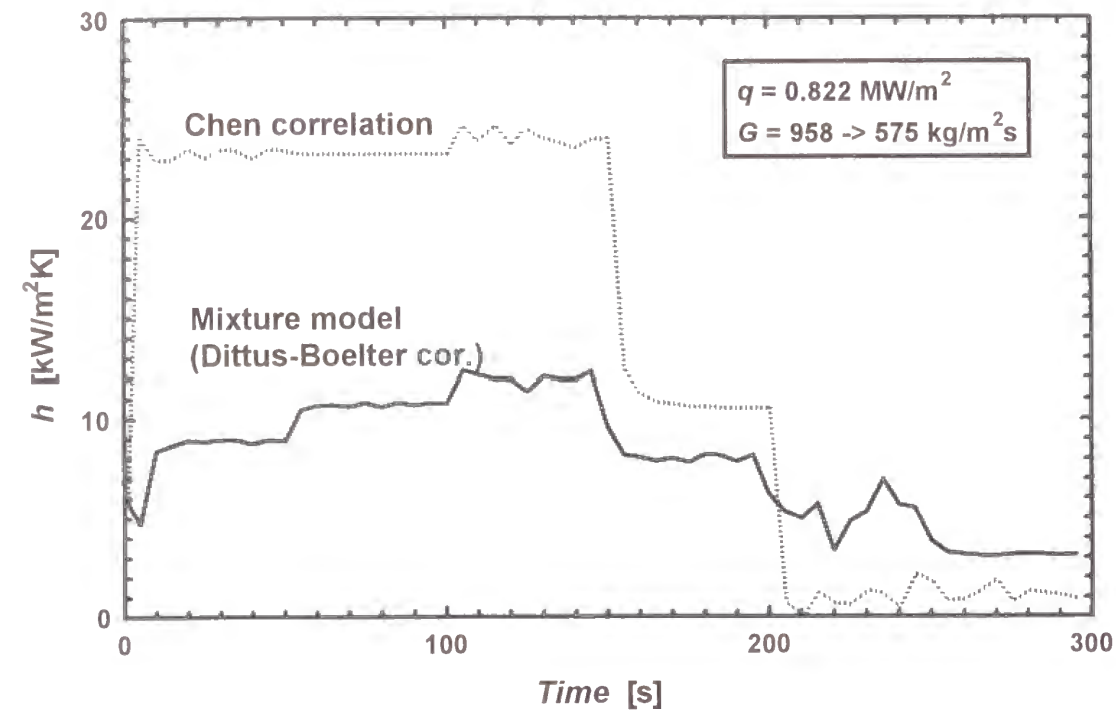


図5.3 Chenの式とミクスチャモデルによる壁面熱伝達率の計算例

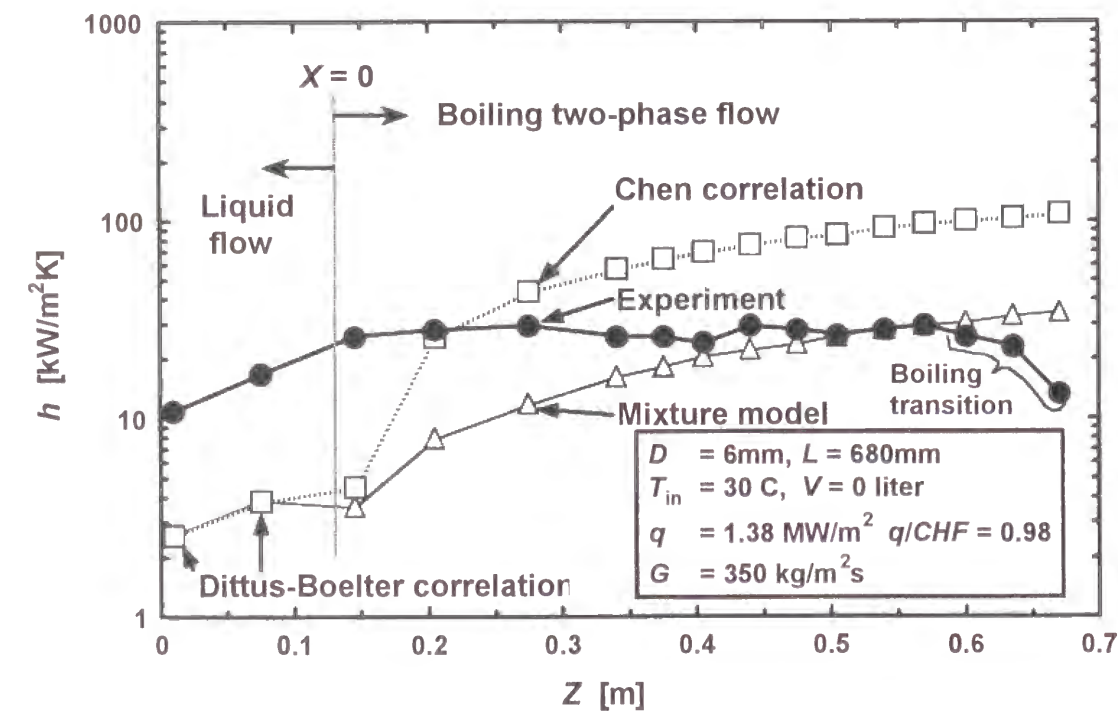


図5.4 壁面熱伝達率モデルによる計算値と実験値の比較

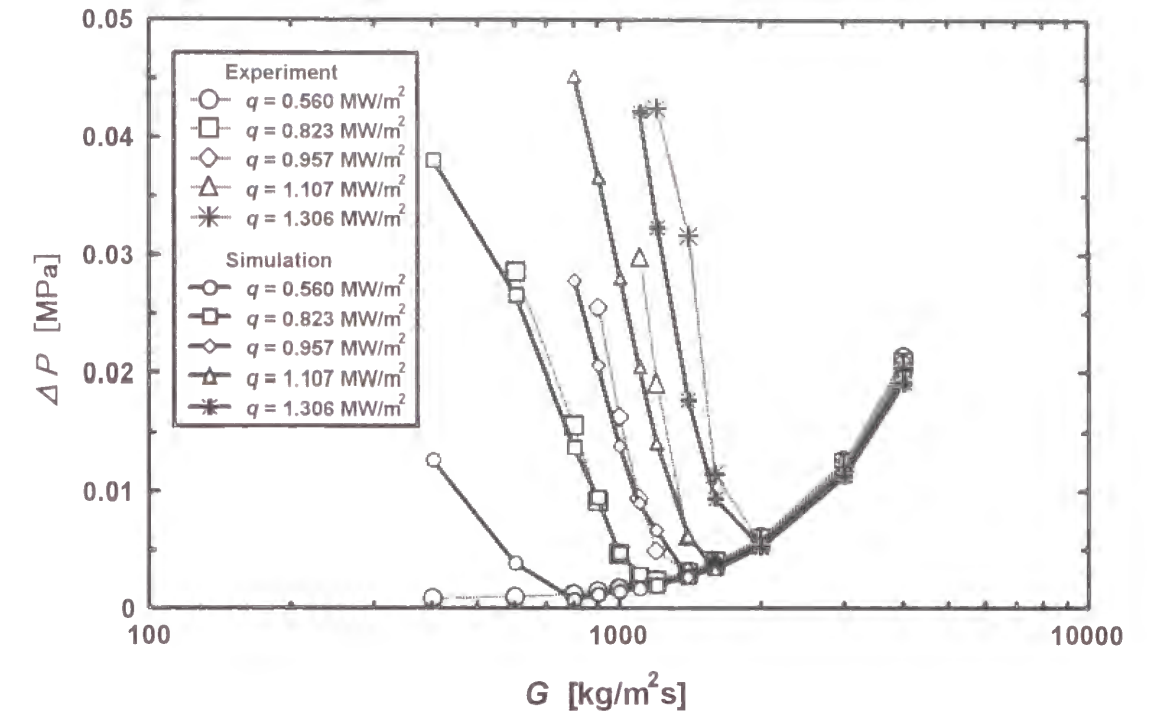


図5.5 静圧力損失の計算値と実験値の比較

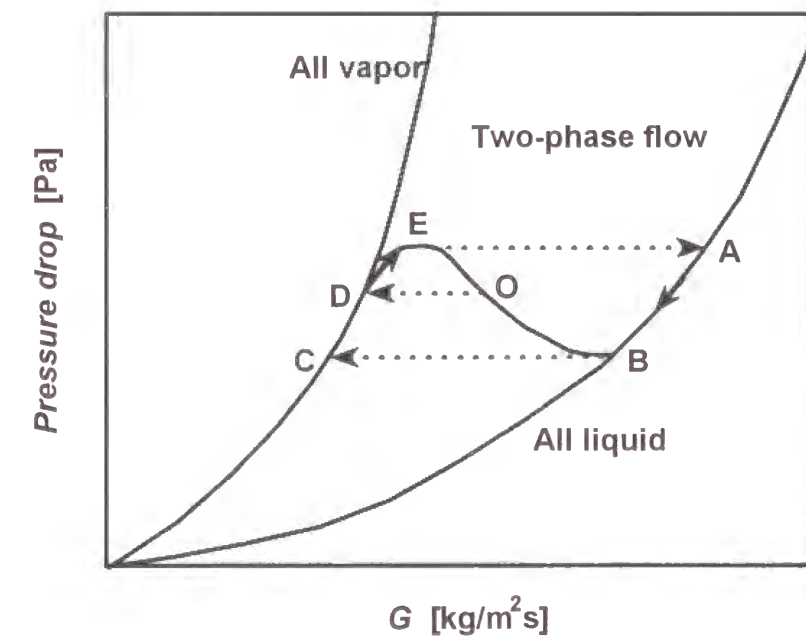


図5.7 圧力降下振動の変動特性

Case 1 : $G = 448 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $V = 4.16 \text{ liter}$

Experiment

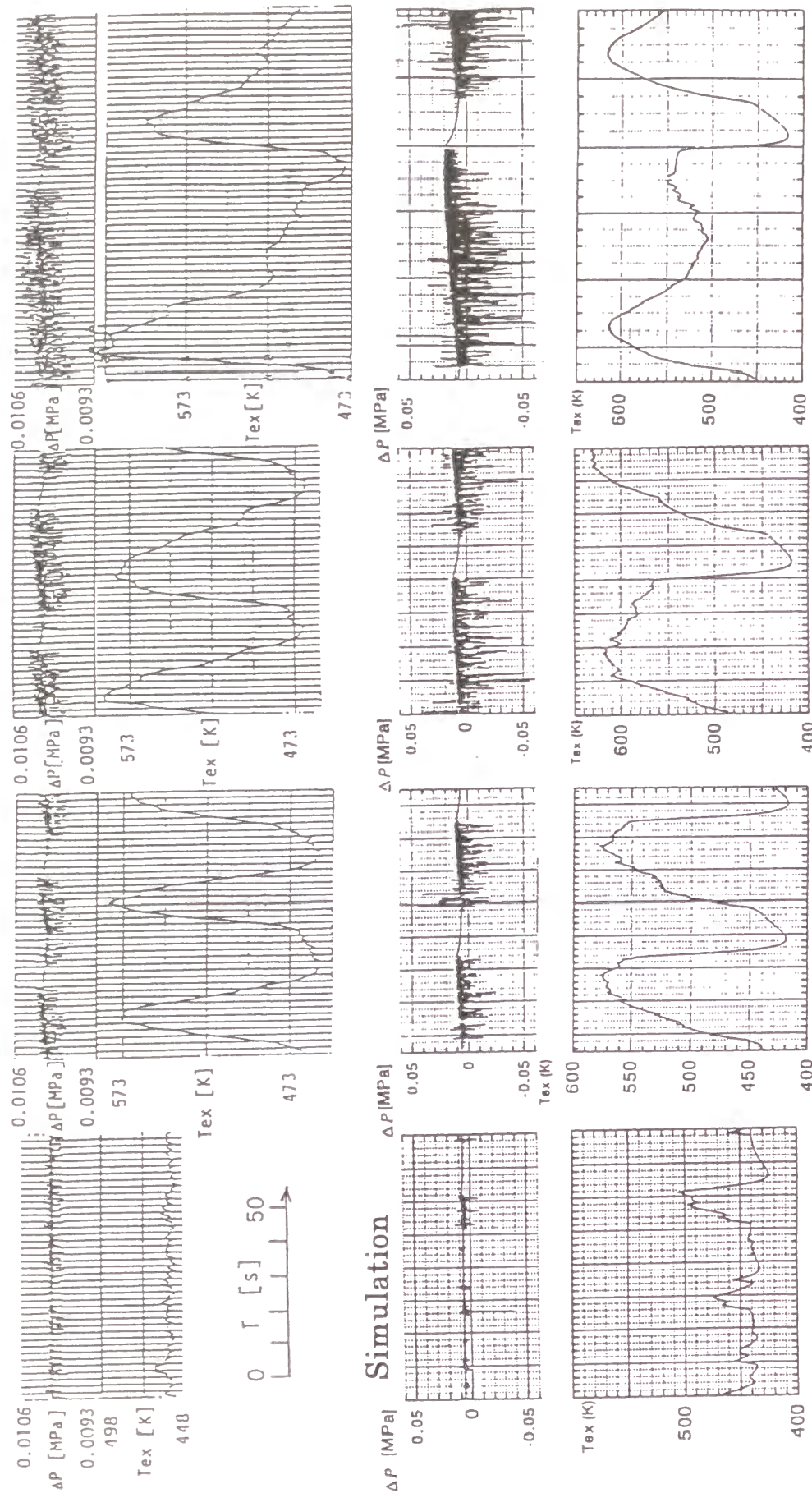


図5. 6 熱流束上昇に伴う不安定流動現象の数値解析結果と実験結果の比較

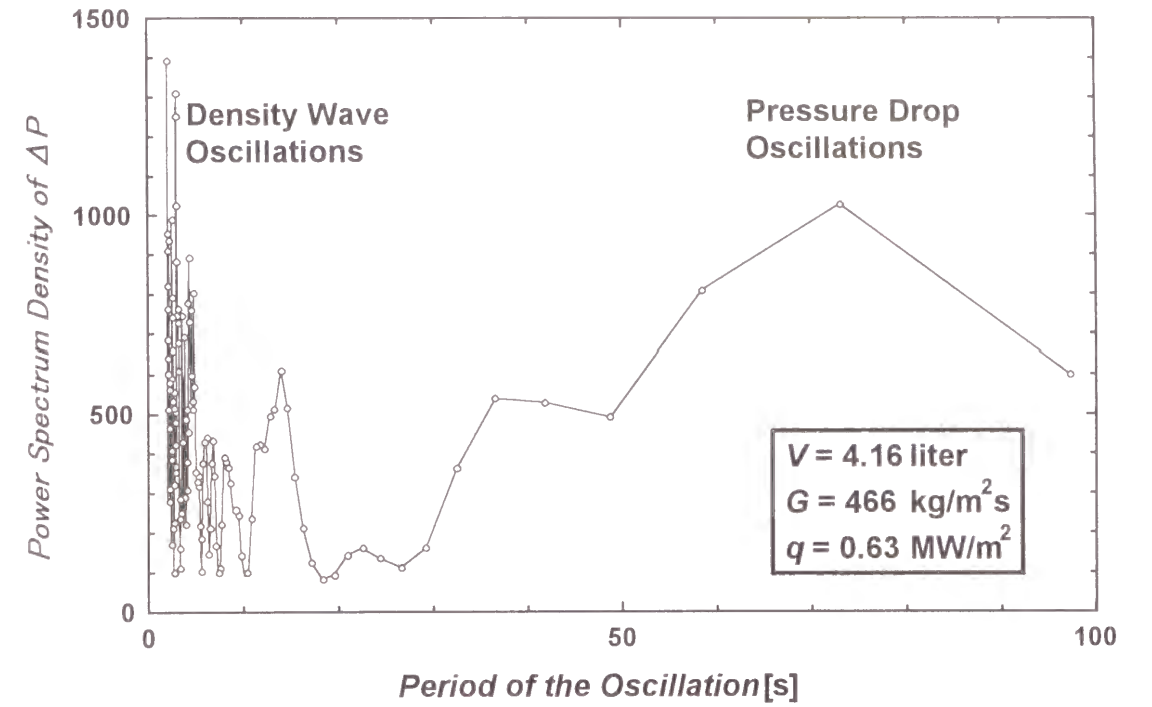


図5. 8 スペクトル解析による圧力降下振動と密度波振動の振動周期の分析例

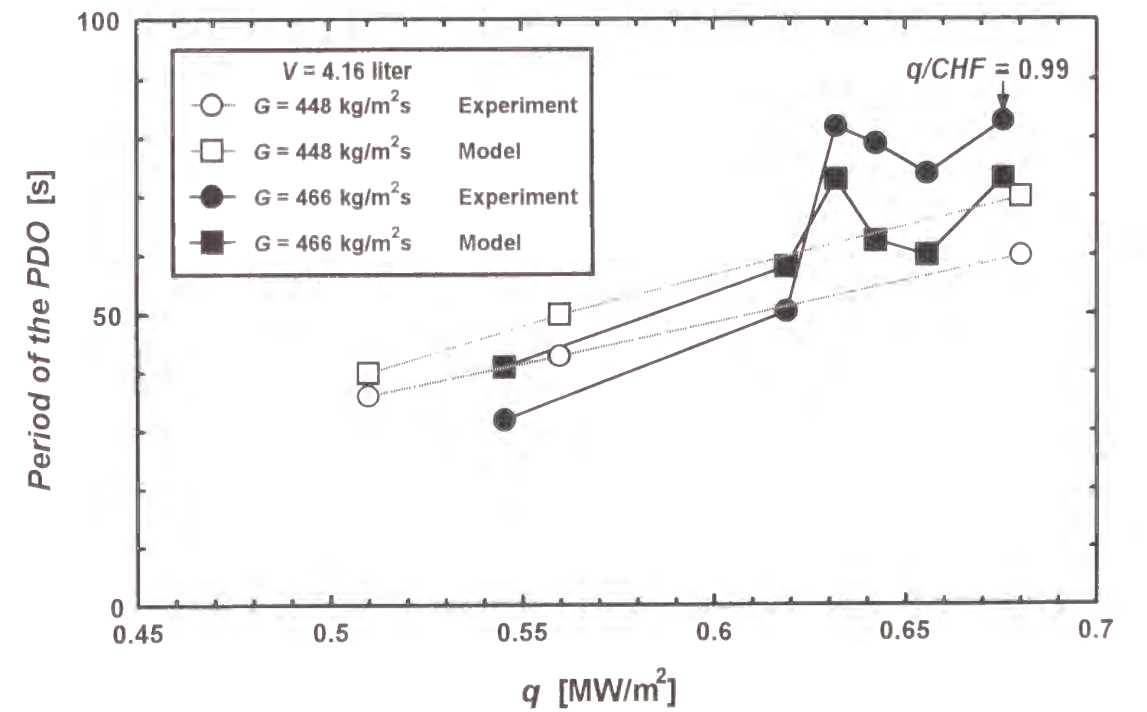
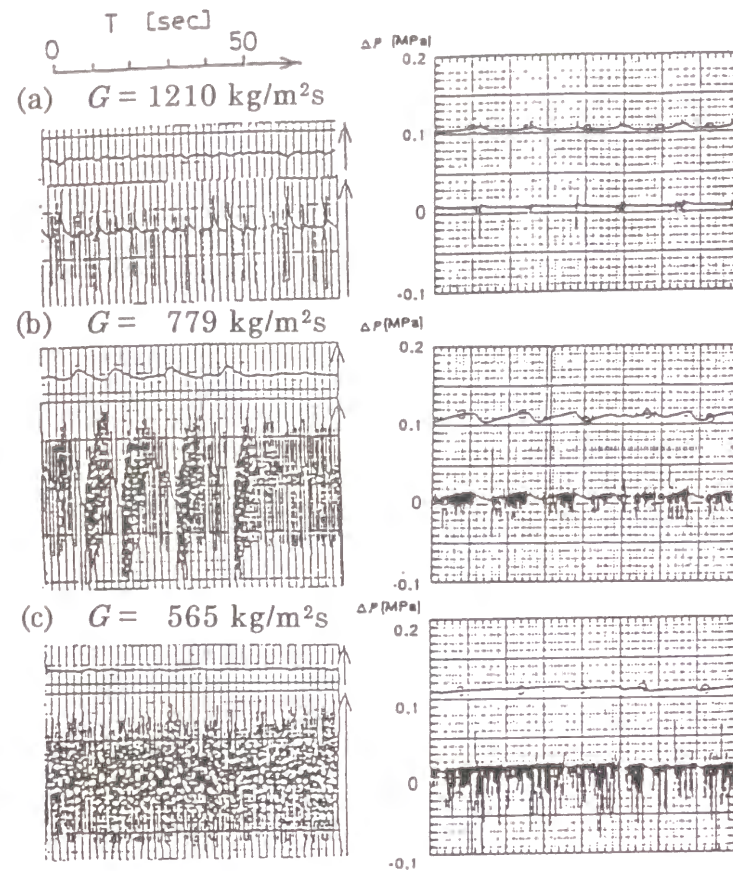


図5. 9 圧力降下振動の振動周期



Experiment

Simulation

図5.10 流量低下に伴う不安定流動現象の数値解析結果と実験結果の比較

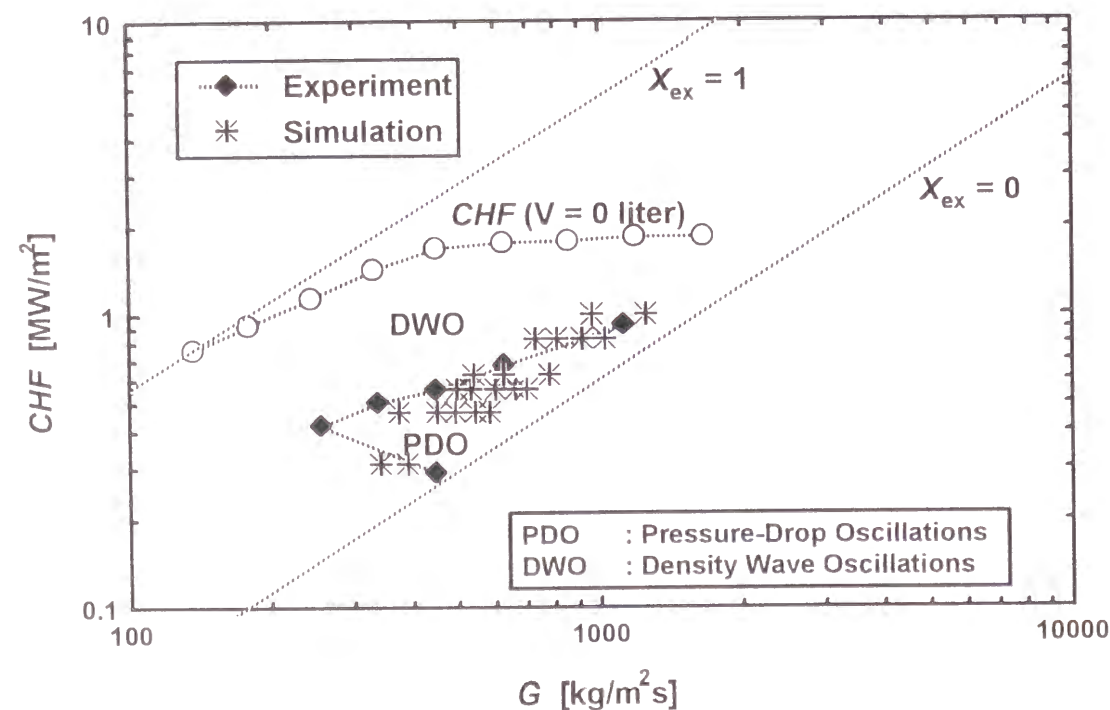


図5.11 不安定流動発生領域の予測結果

第6章 総括

本研究は、大気圧下の小口径円管内強制流動の圧力損失、熱伝達率、バーンアウト、不安定流動について、実験的、解析的に研究を行ったものである

第2章 小口径円管内強制流動沸騰実験

第2章では、小口径円管内強制流動沸騰に関する幾種類もの実験を行い、得られた結果をまとめた。以下に、本実験によって明らかとなった点を示す

- (1) 水平に設置した小口径円管内沸騰流の圧力損失特性を測定し、得られた実験結果と簡単なモデルによる予測値とを比較した。比較結果から、摩擦損失の計算を Martinelli-Nelson の整理法で計算し、加速損失の計算には、環状流モデルを基礎とし、Smith の式でボイド率を計算したモデルが最も実験結果に近い値を予測することがわかった
- (2) 管内径、質量速度および加熱部入口からの距離が熱伝達率に及ぼす影響を調べた。その結果、管内径が小さくなると熱伝達率が低下すること、質量速度の影響は局所クオリティが0以下で顕著であり質量速度が大きいほど熱伝達率が高くなることがわかった。そして、液単相領域では通常口径管と同様に熱的助走区間が存在し入口からの距離が小さいほど熱伝達率が高く壁温が低くなること、全ての実験条件で $Nu-X$ グラフ上で $X=0$ を境に特性が変わる共通点があることがわかった
- (3) 主要パラメータが限界熱流束に及ぼす影響を調べた。実験の結果、同じ L/D の場合、基本的には管内径が小さいほど限界熱流束が高い値となり、特に中間クオリティ領域で、管内径の影響が顕著である。 L/D が限界熱流束に及ぼす影響を詳細に調べた結果、 L/D が小さいほど限界熱流束が高くなり、その増加率は L/D が小さいほど、また質量速度が大きいほど大きい。また、入口水温の影響を、出口クオリティの関数として整理した結果、低流速では、データがばらつく特殊な領域を除くと入口サブクール度に依存しないこと。そして、高流速で出口クオリティが0近傍でバーンアウトする領域では、限界熱流束は出口クオリティが0近傍で最小値をもち、サブクール領域では入口サブクール度が大きいほど限界熱流束が高くなることがわかった。
- (4) 不安定流動時の熱水力特性、限界熱流束特性、そして不安定流動発生領域を実験により明らかにした。実験の結果、加熱部内差圧の静圧力特性で、圧力勾配が負とな

る流量範囲で圧力降下振動が発生する。圧力降下振動発生領域は、出口クオリティが0以上の低い値の領域であり、この流量範囲内では限界熱流束が圧力降下振動発生領域内まで低下する。そして、不安定流動発生領域は圧縮性空間の体積に依存しないが、限界熱流束は圧縮性空間が大きいほど顕著に低下する。また、限界熱流束特性に関して、CASE 1とCASE 2の2通りで特性が異なることがわかった。

第3章 小口径円管内強制流動熱伝達

第3章では、小口径円管内での強制流動沸騰二相流実験を実施し得られた結果と既存の相関式と比較し、適用の可能性について検討した。そして、以下の結論を得た。

- (1) 既存の壁面熱伝達率相関式による計算値と実験結果を比較した結果、液単相強制対流熱伝達に対する既存の式は、実験結果と比較的良く一致した。本章では、完全に発達した領域における小口径円管内液単相流動熱伝達に関して、層流と乱流を区別せず1式で液単相領域の実験結果を表現できるように Dittus-Boelter 式の修正式を示し、軸方向熱伝達率分布を補正する式もあわせて示した。これらの式により、加熱部長さが短い小口径円管内での液単相熱伝達も計算できることを示した。
- (2) 核沸騰開始条件式である Bergles-Rohsenow の式は、やや高めに壁温を計算する傾向があった。そこで、実験結果をもとに小口径円管内強制流動用の核沸騰開始条件式を示した。
- (3) 飽和核沸騰熱伝達に関する既存の相関式を小口径円管に用いた場合、壁温を低めに計算する傾向があり、特に小口径で高質量速度の場合に予測精度が低下することがわかった。そこで、本実験範囲内の実験結果と比較的良く一致する熱伝達率相関式を示した。
- (4) 小口径円管内での沸騰二相流実験では、加熱部長さが長い場合と極端に短い場合に興味深い壁温変動が発生することがあった。本章では、小口径円管でかつ比較的長い加熱部の場合に観察されるポストDNB現象と極端に短い場合に観察される緩やかな大きなカーブを描く壁温振動の2種類の現象を示し考察した。

小口径円管内強制流動時の熱伝達率予測式を、本章で得られた結論をもとに整理した。

小口径円管内強制流動時の熱伝達に関する今後の課題として、サブクール核沸騰区間の最適熱伝達率予測式の提案があげられる。そのためには、より詳細なデータを幅広く蓄積し評価する必要がある。

第4章 小口径円管内強制流動沸騰バーンアウト

第4章において、小口径円管内バーンアウトに関して、以下のことが明らかとなった。

- (1) バーンアウト発生機構を、バーンアウト直前での加熱部壁面温度の変動特性と可視化観察結果をもとに、①フラッシング型 ②ドライアウト型 ③DNB型に分類し、タイプ別にバーンアウト発生機構を考察した。
- (2) ドライアウト型バーンアウト用に提案された実験相関式や FIDAS コードの本研究範囲への適用の可能性を検討した。実験データとの比較から、管内径が2mm以上、 L/D が25以上では、Lowdermilk の式が実験データとよく一致することが確認された。FIDAS コードの適用性及び問題点を検討した結果、 L/D が50以上では、実験データと比較的よく一致するが、 L/D が25以下では予測誤差が大きくなること、そして高流量域での計算条件の設定時に数値不安定が生じたり、液滴割合を過小評価する等の問題が生じることがわかった。
- (3) DNB型バーンアウト用に提案された実験相関式や機構論的モデルの本研究範囲への適用の可能性を検討した。実験データとの比較から、従来の相関式の中では Zenkevich の式が、最も実験データと一致することがわかった。本章では、本実験で得られたCHFをよりの確に予測できる簡単な実験相関式も併せて示した。従来のDNB型のバーンアウトタイプ用に提案された機構論的モデルと実験データを比較し、適用性の評価を行った。そして、Katto モデル、Celata モデル、Weisman - Pei モデルの特性関数から本研究条件への適用上の問題点を示した。CHF値の予測に関しては、Celata モデルが加熱部長さが短い場合に幾らかの適用上の問題が生じるものの、各物理量がモデルの仮定する条件内にある場合には、最も実験値に近い値を予測することがわかった。また、Katto モデル、Celata モデル、Weisman - Pei モデル内で計算される特性関数と物理量の変化を詳細に検討し、それぞれのモデルによる物理量の計算値を評価した。その結果、特に小口径で短加熱部円管の場合に解を得られなかったり複数解を持つことがあり、モデルが不連続な特性を持つ場合もあることがわかった。また最終的なCHFの予測値が実験結果に近い値であっても、モデルにより計算される物理量が非現実的な値になる場合があり、適用上の注意が必要であることが明らかとなった。

小口径円管内強制流動時の限界熱流束予測法を、本章で得られた結論をもとに整理した。

小口径円管内強制流動時のバーンアウトに関する今後の課題として、以下の点が考えられる

- (1) 本研究では、主として大気圧近傍で機能する機器を研究対象とした。そのため圧力をパラメータとして実験を行っていない。今後、高圧条件下で作動し小口径円管により冷却する機器を研究対象とする場合には、圧力をパラメータとした実験、及びバーンアウト予測手法が必要である
- (2) 小口径円管を用いることにより、極めて高い限界熱流束が達成される。しかし、CHFが50 MW/m²を超える条件での可視化観察は、全周加熱円管では困難であり、また現象が極めて高速に進行することからも未だ機構論的な考察が不十分と思われる
- (3) 従来のモデルや解析手法は一部のデータとはよく一致した。しかしながら、本研究で得られた全データを高精度で予測することはできなかった。また、観察結果と従来のモデルが仮定したイメージが必ずしも一致しておらず、モデル内部で計算される物理量の計算誤差も大きいと考えられる。以上の結論から、今後は特に超高熱流束バーンアウトの発生機構を明らかにする必要がある

第5章 不安定流動時の小口径円管内強制流動沸騰

第5章において、小口径円管内での不安定流動を二流体モデルで数値解析し、解析結果と実験結果とを比較し評価を行った。また、実験結果と解析結果を基に不安流動時の熱水力学挙動を考察した

本来、MINI-TRAC コードを構成する構成式の多くが高圧力用のものであり、低圧力条件下での適用性に関しては評価がなされていなかった。また、圧縮性空間を上流に持つ加熱管内での不安定流動を数値解析で行った例はなかった。第5章では、簡単な数値解析モデルにより、密度波振動や壁温振動を併発する圧力降下振動を解析した。解析は実験条件を入力条件とし、解析結果は実験結果と比較し評価した。まず、静圧力損失特性の解析値と実験値が良く一致することを確認した後、圧力降下振動、密度波振動、壁温振動を計算し、実験データと比較し検討を行った。検討の結果を以下に示す

- (1) 二流体モデルを基礎とした解析モデルにより、大気圧下の小口径円管内不安定流動実験の結果と同様な解析結果を得ることができた。
- (2) 壁面熱伝達率の計算には、Chen の式よりミクスチャモデルを用いた方が適切な計算がなされる

- (3) 密度波振動や壁面温度振動を伴う圧力降下振動発生領域を解析モデルから予測した結果、実験結果に近い領域を予測できた

本解析により圧力降下振動および発生領域が計算でき、実験からは得られなかった情報と実験結果から、大気圧下の小口径円管内で生ずる不安定流動時の熱水力特性を明らかにした

本研究により、圧力損失、熱伝達率、バーンアウト、そして不安定流動時の熱水力挙動の各観点から小口径円管の特徴を明らかにできた。また、各観点別に実験結果と予測計算法を比較し、適用の可能性を検討し適用上の問題点を示した。そして、小口径円管内強制流動に適した予測計算法をそれぞれ示した。

使用記号

CHF	:	限界熱流束	[MW/m ²]
$C_{p\text{f}}$:	定圧比熱	[J/kgK]
D	:	管内径	[m]
e	:	Smith 式中の実験定数	[-]
f	:	摩擦係数	[-]
F	:	レイノルズ数因子	[-]
h	:	熱伝達率	[W/m ² K]
h_{bo}	:	熱伝達率(核沸騰寄与分)	[W/m ² K]
h_{FC}	:	熱伝達率(強制対流寄与分)	[W/m ² K]
$h_{\text{fg}}, H_{\text{fg}}, \Gamma$:	蒸発潜熱	[kJ/kgK]
h_{in}	:	入口エンタルピ	[kJ/kgK]
h_{L0}	:	全量が液相として流れた時の熱伝達率	[W/m ² K]
h_{sat}	:	飽和エンタルピ	[kJ/kgK]
Δh_{sub}	:	入口サブクーリング	[kJ/kgK]
h_{TP}	:	二相流時の熱伝達率	[W/m ² K]
k	:	熱伝導率	[W/mK]
k_{f}	:	液相の熱伝導率	[W/mK]
L	:	加熱部長さ	[m]
L_{sab}	:	サブクール区間の長さ	[m]
L_{TP}	:	二相流区間の長さ	[m]
L/D	:	加熱部長さと管内径の比	[-]
g	:	重力加速度	[m/s ²]
G	:	質量速度	[kg/m ² s]
G_0	:	基準質量速度	[kg/m ² s]
N_{sub}	:	サブクーリング数(式. 2. 21)	[-]
Nu	:	ヌッセルト数	[-]
ΔP	:	加熱部内差圧、全圧力損失	[MPa]
ΔP_{a}	:	加速損失	[MPa]
ΔP_{f}	:	摩擦損失	[MPa]
ΔP_{f0}	:	全圧力損失	[MPa]
$\Delta P_{\text{f,sub}}$:	サブクール区間の摩擦損失	[MPa]
ΔP_{h}	:	位置損失	[MPa]
ΔP_{L0}	:	液相のみが流れた場合の圧力損失	[MPa]
Pr	:	プラントル数	[-]
P_{sw}	:	飽和圧力	[MPa]
q	:	熱流束	[MW/m ²]

q_{inc}	:	核沸騰開始熱流束	[MW/m ²]
$q_{\text{max,max}}$:	上限熱流束	[MW/m ²]
Re	:	レイノルズ数	[-]
Re_{tpp}	:	二相レイノルズ数	[-]
r_{i}	:	管内半径	[m]
r_{o}	:	管外半径	[m]
S	:	核沸騰抑制因子	[-]
T	:	温度	[K]
T_{ex}	:	出口水温	[°C]
T_{f}	:	水温	[°C]
T_{in}	:	入口水温	[°C]
ΔT_{in}	:	入口サブクール度	[°C]
T_{sat}	:	飽和温度	[°C]
ΔT_{sat}	:	過熱度	[K]
$T_{\text{w,inside}}$:	管内壁面温度	[°C]
$T_{\text{w,outside}}$:	管外壁面温度	[°C]
V	:	圧縮性空間の体積	[liter]
X	:	局所(熱平衡)クオリティ	[-]
X_{ex}	:	出口クオリティ	[-]
X_{tt}	:	Lockhart-Martinelli パラメータ	[-]
z	:	管入口からの距離	[m]

α	:	ボイド率	[-]
α_{ex}	:	出口ボイド率	[MW/m ²]
β	:	水の体熱膨張率	[1/°C]
δ	:	薄液膜の厚さ	[m]
μ_{f}	:	液相の粘性係数	[Ns/m ²]
μ_{g}	:	気相の粘性係数	[Ns/m ²]
ν	:	動粘性係数	[m ² /s]
$\rho_{\text{f}}, \rho_{\text{l}}$:	液相の密度	[kg/m ³]
$\rho_{\text{g}}, \rho_{\text{v}}$:	気相の密度	[kg/m ³]
ρ_{H}	:	均質流モデルで仮定する密度	[kg/m ³]
ξ	:	無次元流量	[-]
σ	:	表面張力	[N/m]

参考文献

【あ】

- ◇ 赤川・坂口・世古口・小林, 機論, **35** - 276, 1714(1969).
- ◇ 秋本・阿部・大貫・村尾, *JAERI-M*, **91** - 086(1991).

【い】

- ◇ 井出・松村・門出, 機論, B, **59** - 559, 795 - 801(1993-3).
- ◇ 稲坂・成合・志村, 機論, B, **52** - 476, 1817 - 1821(1986-4).
- ◇ 稲坂・成合・志村, 機論, B, **53** - 494, 3093 - 3099(1987).
- ◇ 稲坂・成合・藤崎・石黒, 機論, B, **58** - 545, 216 - 222(1992-1).

【う】

- ◇ 植田, 火力発電, **11** - 4, 325 - 332(1960).
- ◇ 梅川・小澤・宮崎・三島・日引, 機論, B, **61** - 583, 1048 - 1054(1995-3).

【か】

- ◇ 甲藤・吉原, 機論, B, **55** - 519, 3515 - 3522(1989-11).
- ◇ 甲藤・吉原, 機論, B, **56** - 528, 2453 - 2460(1990-8).
- ◇ 甲藤・大野, 機論, B, **50** - 459, 2621 (1984).
- ◇ 仮屋崎・深野・逢坂・香川, 機論, B, **58** - 533, 2684 - 2690 (1992-9).

【き】

- ◇ 木下・成合・稲坂・吉田, 第3 2回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **F141**, 269 - 270(1995-5).

【く】

- ◇ 呉田・三島・西原・田坂, 機論, B, **60** - 574, 2089 - 2094(1994).
- ◇ 呉田・三島・西原, 機論, B, **61** - 591, 4109 - 4116(1995).
- ◇ 呉田・三島・日引・西原, 京都大学原子炉実験所、第2 9回学術講演会, 51 - 59(1995).

【こ】

- ◇ 児玉茂雄, 修士論文, 京都大学(1996).
- ◇ 小林利行, 修士論文, 京都大学(1997).

【し】

- ◇ 清水, 機論, B, **45** , 409 (1759).

【す】

- ◇ 数土, 機論, B, **62** - 594, 721 - 728(1996-2).
- ◇ 数土, 機論, B, **62** - 601, 3376 - 3382(1996-9).
- ◇ 数土, 機論, B, **63** - 608, 1305 - 1311(1997-4).

【せ】

- ◇ 世古田・井出・松村・武石・間・中里美, 機論, B, **58** - 549, 1372 -1377(1992-5).

【た】

- ◇ 高橋・稲葉・河原・芹澤・河野, 第3 1回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **E231**, 646 - 648(1994-5).

【ち】

- ◇ 張・呉田・三島・西原, 京都大学原子炉実験所、第3 0回学術講演会, 39 - 48(1996).

【と】

- ◇ 戸田・橋爪, 機械の研究, **47** - 1, 168 - 173(1995-1).
- ◇ 戸田, 伝熱工学の進展, **3**, 普賢堂, 211 (1973).

【な】

- ◇ 成合・稲坂・上原, 機論, B, **54** - 502, 502(1988).
- ◇ 成合・稲坂・上原, 機論, B, **60** - 502, 1406 - 1410(1988-6).
- ◇ 成合, 機論, B, **60** - 580, 4215(1994-12).

【ミ】

- ◇ 三島・呉田・菅原, 第 1 2 回混相流シンポジウム, B21, 221 - 224(1993).

【も】

- ◇ 森山清史, 博士論文, 東京工業大学 (1993).

【A】

- ◇ Araki, M., Dairaku, M., Inoue, T., Komada, M., Kuriyama, M., Matuda, S. Ogawa, M., Ohara, Y., Seki, M., and Yokoyama, K., *Fusion Engineering and Design*, 9, 231 - 236(1989).
- ◇ Araki, M., Ogawa, M., Akiba, M., Suzuki, S., *Fusion Technology*, 21, 1835 -1839 (1992-5).
- ◇ Araki, M., Ohara, Y. and Okumura, Y., *Fusion Technology*, 17, 555 - 565 (1990-6).

【B】

- ◇ Bankoff, S. G., *Trans. ASME*, Ser. C, 82-4, 265(1960).
- ◇ Barajas, A. M. and Panton, R. L., *Int. J. Multiphase Flow*, 19, 337 - 346 (1993).
- ◇ Barnea, D., Luninski, Y. and Taitel, Y., *Can. J. Chem. Engng*, 61, 617 - 620 (1983).
- ◇ Baxi, C. B. and Falter, H., *Fusion Technology*, 1992, 186 (1993).
- ◇ Baxi, C. B. et al., *IAEA Work Shop*, UCLA (1993).
- ◇ Bergel'son, B. R., *Thermal Engng*, 27 (1), 48 - 50 (1980).
- ◇ Bergles, A. E., *Nuel. Safety* 18 (2), 154 - 167 (1977).
- ◇ Bergles, A. E. *ASME*, 63 - WA - 182, 1 - 8 (1963).
- ◇ Bergles, A. E., Collier, J. G., Delhay, J. M. Hewiff, G. f. and Mayinger, F., *Hemisphere Publishing Corporation*, New York, 226 - 255(1981).
- ◇ Bergles, A. E. and Rohsenow, W. M., *Engineering Projects Laboratory Report* 8767 -21, M. I. T., May 25, (1962).
- ◇ Bergles, A. E. and Rohsenow, L. M. K., *ASME*, Ser. C, 86, 365-372(1964).
- ◇ Biswas, J. and Greenfield, P. E., *Int. J. Multiphase Flow*, 11, 553 - 563 (1985).
- ◇ Boyd, R. D., *Fusion Technol.* 7 (1), 19 - 30 (1985).
- ◇ Boyd, R. D., *Fusion Technology*, 7(1), 31 - 52(1985).

- ◇ Boyd, R. D., *Fusion Technol.* 13 (1), 644 - 653 (1988).
- ◇ Boyd, R. D., *J. Heat Transf.*, 113, 264 - 266 (1991).

【C】

- ◇ Cattadori, G., Gaspari, G. P., Celata, G. P., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 7, 230 - 240 (1993).
- ◇ Celata, G. P., Cumo, M. Mariani, A. Simoncini, M. and Zummo, G., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 37-1, 347 - 360 (1994).
- ◇ Celata, G. P. and Mariani, A., *Specialists Workshop on the Thermal - Hydraulics of High Heat Flux components in Fusion Reactors*, Coordinated by Celata, G. P. and Mariani, A., ENEA -C. R. E. Casaccia, Italy(1993).
- ◇ Celata, G. P., Cumo, M. and Mariani, A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1, 237 - 255(1994).
- ◇ Celata, G. P., *Proc. of the International Conference on Multiphase Flow*, P, 191 Tsukuba, Tukuba, Japan, 24 - 27 (1991).
- ◇ Chen, J. C., *ASME Paper*, 63-HT-34(1963).
- ◇ Cheng, X., Erbachar, E. J., Muller, U., Zeggel, W., *Proceeding of The Int. Conference on Multiphase Flows' 91* - Tsukuba September, 24 - 27(1991).
- ◇ Chisholm, D., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 10, 1767 - 1778 (1967).
- ◇ Collier, J. G., *McGraw-Hill Book Co.*, New York, 144 - 177(1981).
- ◇ Collier, J. G., *McGraw-Hill Book Co.*, New York(1972).

【D】

- ◇ Daleas, R. S. and Bergles, A. E., ASME Paper No. 65 - HT - 67(1965).
- ◇ Deissler, R. G., *NACA TN* 3145(1954), NACA Rept. 1210(1955).
- ◇ Delhay, J. M., Giot, M. and Rihthmullers, M. L., *Hemisphere Publishing Corporation*, (1981).
- ◇ Dengler, C. E. and Addoms, J. M., *Chem. Eng. Prog. Symp. Ser.*, 52-18, 95(1956).
- ◇ Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., *Univ. Calif. Pubs. Eng.*, 2, 443(1930).

【E】

- ◇ Ezzidi, A. A., Mishima, K. and Nishihara, H., *Annul Reports of Research Reactor*

Institute, Kyoto Univ., **25**, 100 - 112 (1992).

[F]

- ◇ Faggiani, S. and Grassi, W., *Proc. 9th Int. Heat Transfer Conf.*, Jerusalem, **1**, 275(1990).
- ◇ Fiori, M. P. and Bergles, A. E., *Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. **VI**, B6. 3. Hemisphere, New York (1970).
- ◇ Fukano, T. and Kariyasuki, A., *Nucl. Eng. Design*, **141**, 59 - 68 (1993).
- ◇ Fukano, T., Kariyasuki, A. and Kagawa, M., *Trans. JSME*, **56**, B,2318 - 2326 (1990).
- ◇ *Fusion Engineering and Design*, **21**, 213 - 293 (1993).

[G]

- ◇ Galloway, J. E. and Mudawar, I. *Int. J. Heat Mass Transf.*, **36** - 10, 2511 - 2526 (1993).
- ◇ Galloway, J. E. and Mudawar, I. *Int. J. Heat Mass Transf.*, **36** - 10, 2527 - 2540 (1993).
- ◇ Gambill, W. R., *Nucl. Safety*, **9** (6), 467 - 480 (1968).
- ◇ Gambill, W. R. and Lienhard, J. H., *ASME J. Heat Transf.*, **113** -3, 815 (1989).
- ◇ Gibson, A. H., *Phil. Mag.*, **26**, 952 (1913).
- ◇ Gnielinski, V., *Int. Chem. Eng.*, **16** - 2, 359(1976).
- ◇ Griffel, J., *Rep, NYL* - **187** - 7, Columbia Univ. (1965).
- ◇ Grimley, J. A. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31**, 55 (1988).

[H]

- ◇ Hancox, W. T. and Nicoll, W. B., *ASME Paper*, **73** - HT - 38 (1973).
- ◇ Haramura, Y. and Katto, Y., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **26**, 389 - 399 (1983).
- ◇ Hebel, W., Detavernier, W. and Decretton, M., *Nucl. Engng Des.*, **64**, 433 - 445 (1981).
- ◇ Hibiki, T., Mishima, K., Yoneda, K., Fujine, S., Kanda, K., Nishihara, H., Tsuruno, A. and Matsubayashi, M., *J. Nucl. Sci. Technol.*, **30**, 516 - 523 (1993).
- ◇ Hijikata, K., Mori, Y., Nagasaki, T. and Nohata, K., *Trans. JSME*, **51**, B, in Japanese, 1033 - 1041 (1985).
- ◇ Hino, R. and Ueda, T., *Int. J. Multiphase Flow*, **11**, 283 - 298 (1985).
- ◇ Hsiao, W., Ho, Chywan, K., Tu, Shei, B., Pei, and Jang, C., Chang., *Nuclear Technology*, **103**, 332 - 345 (1993-9).

- ◇ Hsu, Y. Y. and Graham, R. W., *American Nuclear Society*, 217 - 232(1986).

[I]

- ◇ Ide, H., Matsumura, H. and Kado, H., *Trans. JSME*, **59**, B, 795 - 801 (1993).
- ◇ Inasaka, F. and Nariai, H., *JSME Int. Journal*, **30** - 268, 1595 - 1600 (1987).
- ◇ Inasaka, F. and Nariai, H., *Proc. NURETH - 5*, Salt Lake City (1992).
- ◇ Ishii, M. and Zuber, N., *Heat Transfer 1970, Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf.*, Paris, **5**, B5.11(1979).

[J]

- ◇ Jens, W. H. and Lottes, P. A., *USAEC Rep.*, ANL - **4627**(1951).

[K]

- ◇ Kakac, S., and Mayinger, F., *Hemisphere Publishing Corporation*, **1** (1976).
- ◇ Kataoka, I., Kodama, S., Tomiyama, A. and Serizawa, A., *Proc. of the Japan - U. S. Seminar on Two-Phase Flow Dynamics*, Fukuoka, Japan, 145 - 152(1996).
- ◇ Katto, Y., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **22**, 1567 - 1575 (1979).
- ◇ Katto, Y., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **33** - 4, 611 - 620 (1990).
- ◇ Katto, Y., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **35** - 5, 1115 - 1123 (1992).
- ◇ Knoebel, H., *USAEC Rep*, E. I. Dupont de Nemours and Company, DP-**1036** (1973).
- ◇ Kopchikou, I. A. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **12**, 295 (1978).
- ◇ Koshelev, S. B. et al., *High Temperature*, **23**, 441(1985).
- ◇ Koski, J. A. and Croessmann, C. D., *ASME Paper No.* **88** - WA/NE - 3 (1988).
- ◇ Koski, J. A. et al., *Fusion Technol.*, **19**, 1729 - 1735 (1991).
- ◇ Kovalev, S. A., *Heat Transf. - Sov. Res.*, **8** - 4, 73 - 78 (1976).
- ◇ Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, H. and Tasaka, K., *Heat Transfer - Japanese Research*, **23**(5), 415 - 425(1994).
- ◇ Kureta, M., Mishima, K. and Nishihara, H., *Open Forum, ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, Maui, Hawaii, USA(1995).
- ◇ Kureta, M., *Young Engineers Forum, 4th Int. Conf., Nuclear Engineering, ICON-4*, New Orleans, Louisiana, USA(1996).

- ◇ Kuriyama, M., Araki, M., Horiike, H., Matsuda, S., Matsuoka, M., Ohara, Y., Okumura, Y., Shibamura, K., Shirakata, H., *Fusion Engineering and Design*, **2**, 237 - 243(1989).
- ◇ Kutateladze, S. S., *Heat Transfer in Condensation and in Boiling*. Mashgiz (1952).
- ◇ Kutateladze, S. S. and Leont'ev, A. I., *Proc. 3rd. Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. **III**, 1 - 6. Hemisphere, New York (1966).

[L]

- ◇ Lee, C. H. and Mudawar, I., *Int. J. Multiphase Flow*, **14**, 711 - 728 (1988).
- ◇ Lee, D. H., *Pt. III. AEEW - R355* (1965).
- ◇ Levy, S., Healzer, J. M. and Abdollahian, D., *Nuclear Engineering and Design*, 131 - 140(1981).
- ◇ Lavy, S., *GEAP - 5157*, General Electric Company(1966).
- ◇ Lin, A. H., Zhang, X., Chen, X. J., Veziroglu, T. N., and Kakac, S., *Int. J. Eng. Fluid mech.*, **1** - 4, 427 - 444 (1988).
- ◇ Lin, K. W. Lee, C. H. Hourng, L. W. Hsu, J. C. *Warme - und Stoffubertagung*. **29**, 319 - 327(1994).
- ◇ Loosmore, C. S. and Skinner, B. C., S. M. *Thesis, Massachusetts Institute of Technology*, (1965).
- ◇ Lowdermilk, W. H., Lanzo, C. D. and Siegel, B. L., *NACA Tech. Note*, **4382** (1958).

[M]

- ◇ Martinelli, R. C. and Nelson, D. B., *Trans. ASME*, **70**-6, 39(1948).
- ◇ Mattson, R. J., Hammitt, F. G. and Tong, L. S., *ASME Paper*, **73** - HT - 39(1973).
- ◇ Maubetsch, J. S. and Griffith, P., *Proc. 3rd. Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, **4**, 247 - 257 (1966).
- ◇ Mirshak, S., Durant, W. S., and Towell, R. H., *DP-355, Savannah River Laboratory*, (1959-2).
- ◇ Mishima, K. and Hibiki, T., *Int. J. Mult. Flow*, **22**-4, 703-712(1996).
- ◇ Mishima, K., Nishihara, H., Kureta, M., and Tasaka, K., *Proc. 6th. Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-6*, Grenoble, France, 435 - 443(1993).
- ◇ Mishima, K., Hibiki, T. and Kureta, M., *Proc. US-Japan Workshop on Helium Cooled High*

- Heat Flux Components*, San Diego, California, USA(1994).
- ◇ Mishima, K., Zhang, J., Kureta, M. and Nishihara, H., *Proc. 3rd. KSME/JSME Thermal Engineering Conf.*, Korea, Vol. **3**, 405 - 410(1996).
- ◇ Mizumoto, M. et al., *2nd. Int. ADTT Conf.*, 2 -7, June, Kalmar, Sweden (1996).
- ◇ Mori, S. et al., *Fusion Technology*, **21**, 1744 (1992).

[N]

- ◇ Nariai, H., and Inasaka, F., *Fusion Engineering and Design*, **2**, 245 - 249 (1989).

[O]

- ◇ Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., *High Temperature*, **3** - 3, 400 - 406(1965).
- ◇ Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., *High Temperature*, **3** - 3, 1595 - 1600(1987).
- ◇ Ornatskii, A. P. and Kichigan, A. M., *Teploenergetika* **6**, 75 - 79 (1962).
- ◇ Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., *Teplofizika Vysokikh Temperature (High Temp.)*, **3** (3), 444 - 451 (1964).
- ◇ Ornatskii, A. P. and Vinyarskii, L. S., *Teplofizika Vysokikh Temperatur (High Temp.)*, **3** (6), 881 - 883 (1964).

[P]

- ◇ Padki, M. M., Liu, H. T., and Kakac, S., *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **12**, 240 - 248(1991).
- ◇ Padki, M. M., Palmer, K., Kakac, S., et al., *Int. J. Heat Mass. Transf.*, **35**, 525 - 532(1992).
- ◇ Petukov, B. S., *Advances in Heat Transf.*, **6**, 523(1970).
- ◇ Purcupile, J. C. and Gouse, S. W. Jr., *ASME Paper*, **72** - HT - 4 (1972).

[S]

- ◇ Sani, R. L., *USAEC Rep.*, UCRL-**9023**(1960).
- ◇ S. B. van der Melen and Galjee, F. W. B. M., *Proc. 6th. Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. **1**, Hemisphere, New York, 381 - 385(1978).
- ◇ Serizawa, A., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **26** - 6, 921 - 932 (1983).
- ◇ Shah, M. M., *ASHRAE Trans.*, **83**, 202(1977).
- ◇ Saha, P. and Zuber, N., *Proc. 5th. Int. Heat Transf. Conf.*, Tokyo, **4**, 175 - 179(1974).

- ◇ Sleicher, C. A. and Rouse, M. W., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **18** - 5,677(1975).
- ◇ Smith, S. L., *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **184** - 36, 647(1967).
- ◇ Smogalev, I. P., *Thermal Engng*, **28** (4), 208 - 211(1981).
- ◇ Styrikovich, M. A., Newstrueva, E. I. and Dvorina, G. M. *Proc. 4th. Int. Heat transfer Conf.*, Vol. **2**, Hemisphere, New York, 360 - 362(1970).
- ◇ Sugawara, S., Katsuta, K., Ishihara, I. and Muto, T., *Int. Proc. 4th. National Heat Transfer Symp. of Japan*, 169 - 172 (1967).
- ◇ Sugawara, S., Miyamoto, Y., *Nuclear Engineering and Design*, **120**, 147 - 161(1990).

[T]

- ◇ Thom, J. R. S., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **7**, 709(1964).
- ◇ Thom, J. R. S., et al., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, **180**, Pt 3C, 226(1966).
- ◇ Thompason, B. and Macbeth, R. V., *UKAE Rep., AEEW - R*, **356** (1964).
- ◇ Thorgerson, E. J., Knoebel, D. H. and Gibbons, J. H., *Trans. ASME, Series C, J. Heat Transf.*, **96**, 79 - 82 (1974).
- ◇ Tippetts, F. E., *ASME*, **25** - 30, Nov. Paper No. 62 -WA - 162, New York (1962).
- ◇ Toda, S and Kurokawa, M., *Proc. LIMET*, **88**, Avignon (1988).
- ◇ Toda, S et al., *Fusion Technology*, **505** (1985).
- ◇ Tong, L. S., *ASME Paper*, **75** - 1 - 1T - 68 (1975).
- ◇ Tong, L. S., Currin, H. B., Larsen, P. S. and Smith, O. G., *Chem. Engng Prog. Symp. Ser.* **62** (64), 35 - 40 (1965).
- ◇ Tong, L. S., Effering, L. E. and Bishop, A. A., *ASME Paper* **66** WA/HT - 39 (1966).
- ◇ Tong, L. S., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **11**, 1208 - 1211 (1968).
- ◇ Tong, L. S., *J. Nucl. Energy.*, **21**, 241 - 248(1967).
- ◇ Tung, K. W. and Parlange, J. Y., *Acta Mechanica*, **24**, 313 - 317(1976).

[V]

- ◇ Vandervolt, C. L., Bergles, A. E. and Jensen, M. K., *Int. J. Heat Transf.*, **37**, 347 - 360(1994).

[W]

- ◇ Waolkins, R. P., Lake, J. A. and Oh, C. H., *A. I. Ch. E. Symposium Series*, No. **275** 83, 134 - 149. (1987).
- ◇ Weisman, J. and Pei, B. S., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **26**, 1463 - 1477 (1983).
- ◇ Weisman, J. and Ying, S. H., *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **45**, 832 - 833 (1983).
- ◇ Weisman, J. and Ileslamlou, *Fusion Technol.*, **13**, 654 - 659(1988).

[Y]

- ◇ Yin, S. T., Cardella, A., Abdelmessih, A. H., Jin, Z. and Bromey, B. P., *Proc. NURETH - 5*, Salt Lake City (1992).
- ◇ Yoshikawa, K., Nimura, Y., Yamamoto, Y., and Watanabe, H., *Fusion Technology*, **17**, 527 - 554 (1990-6).
- ◇ Yuncu, H., Yildirim, O. T. and Kakac, S., *Applied Scientific Research*, **48**, 832 - 104 (1991).

[Z]

- ◇ Zenkevich, B. A., *J. Nucl. Energy, Part B: Reactor Technology*, **1**, 130 - 133(1959).
- ◇ Zukoski, E. E., *J. Fluid Mech.*, **25**, 821 - 837(1966).

発表論文・国際会議等 一覧

- ◇ 呉田・三島・西原・田坂, 機論, B, **60** - 574, 2089 - 2094(1994).
- ◇ 呉田・三島・西原, 機論, B, **61** - 591, 4109 - 4116(1995).
- ◇ 呉田・三島・日引・西原, 京都大学原子炉実験所、第 29 回学術講演会, 51 - 59(1995).
- ◇ 張・呉田・三島・西原, 京都大学原子炉実験所、第 30 回学術講演会, 39 - 48(1996).
- ◇ 三島・呉田・菅原, 第 12 回混相流シンポジウム, B21, 221 - 224(1993).
- ◇ Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, H. and Tasaka, K., *Heat Transfer - Japanese Research*, **23**(5), 415 - 425(1994).
- ◇ Kureta, M., Mishima, K. and Nishihara, H., *Open Forum, ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conf.*, Maui, Hawaii, USA(1995).
- ◇ Kureta, M., *Young Engineers Forum, 4th. Int. Conf., Nuclear Engineering, ICON-4*, New Orleans, Louisiana, USA(1996).
- ◇ Tasaka, K., Saeki, R., Kureta, M., Tamaki, M. and Ohkubo, K., *Proc. 8th. Int. Heat Pipe Conf.*, Beijing, China, 275 - 279(1992).
- ◇ Mishima, K., Nishihara, H., Kureta, M., and Tasaka, K., *Proc. 6th. Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NURETH-6*, Grenoble, France, 435 - 443(1993).
- ◇ Mishima, K., Hibiki, T. and Kureta, M., *Proc. US-Japan Workshop on Helium Cooled High Heat Flux Components*, San Diego, California, USA(1994).
- ◇ Mishima, K., Zhang, J., Kureta, M. and Nishihara, H., *Proc. 3rd. KSME/JSME Thermal Engineering Conf.*, Korea, Vol. 3, 405 - 410(1996).
- ◇ Mishima, K., Zhang, J., Kureta, M. and Nishihara, H., *Heat Transfer - Japanese Research* (1997) (印刷中) .
- ◇ 呉田・小林・三島・西原,
「小口径円管内強制流動液単相流および沸騰二相流の圧力損失と熱伝達」
機論, B, (1997) (印刷中) .
- ◇ Kureta, M., Mishima, K. and Nishihara, H.,
“ Critical Heat Flux for Water Flow Boiling in Small-Diameter Tubes under Low-Pressure Conditions ”
Int. J. Heat Mass Transf.. (投稿準備中) .
- ◇ Kureta, M., Mishima, K. and Nishihara, H.,
“ Pressure Drop and Heat Transfer for Water Flow Boiling in Small-Diameter Tubes under Low-Pressure Conditions ”
Int. J. Heat Mass Transf.. (投稿準備中) .

謝 辞

本研究を行うにあたり研究全般について終始、御指導と御教示を賜り励ましていただきました京都大学原子炉実験所の西原英晃教授に心から御礼申し上げます。

博士論文をまとめる機会を与えて頂き、論文完成の最後まで御助言、御指導を賜りました京都大学工学部原子核工学科の芹澤昭示教授に厚く御礼申し上げます。

また、本論文の完成に際して御指導と御助言を賜りました京都大学工学研究科化学工学専攻の荻野文丸教授に厚く御礼申し上げます。

京都大学原子炉実験所の三島嘉一郎教授には、本研究を行う機会を与えて下さり学部、修士、博士、そして本論文完成までの通算 8 年にわたり詳細な御指導と暖かい御援助を賜りました。心から御礼申し上げます。

京都大学原子炉実験所での通算 6 年間、同じ研究室において研究面、そして生活面で御指導と暖かい御支援を賜り、研究に対する姿勢を示していただいた京都大学原子炉実験所日引俊助教授に心から御礼申し上げます。

日本原子力研究所伝熱流動研究室の秋本肇室長には、本研究をまとめるにあたり貴重な御助言と暖かい御配慮を賜りました。また、大貫晃副主任研究員をはじめ伝熱流動研究室の諸氏には暖かい御支援を賜りました。ここに深甚なる謝意を表します。

名古屋大学原子炉工学講座の故田坂完二教授には修士課程の 2 年間、研究の遂行において非常な御高配を賜り、原子炉工学講座の諸先生、また諸氏には修士課程での 2 年間熱心な討論や諸々の御協力を頂きました。

京都大学原子炉実験所において、山本和喜先輩には特に実験面での御指導を賜り、張俊博士には特に解析面で御支援を賜り、齊藤泰司さんには論文をまとめる際相談にのって頂き、小林利行君には実験面で御協力頂きました。これら幾多の有益な御助言や御支援を賜りました皆様に感謝いたします。

京都大学原子炉実験所での研究を遂行するにあたり京都大学原子炉実験所の所員の皆様、A. EZZIDI 氏、D. T. SONY 氏、小田君、本村君、佐伯君、松枝君、小西さん、そして、ICON-4 で一緒に渡米した皆様方には暖かい励ましを賜りました。

最後に、常に真心をもって私を支え励ましてくれた両親、祖父母、弟に心より御礼申し上げますとともに、博士学位論文完成の御報告を申し上げます。

Masatoshi Kureta, *Doctor Thesis*,
Dept. Nucl. Engng., Kyoto Univ. (1997)

Appendix A

**A DATA SET OF CRITICAL HEAT FLUX FOR
FLOW-BOILING OF WATER IN SMALL-DIAMETER
TUBES UNDER LOW-PRESSURE CONDITIONS**

INTRODUCTION

A Critical Heat Flux(*CHF*) data in small-diameter tubes under low-pressure conditions was collected with the special purpose to make all of the published data widely available.

EXPERIMENTAL DATA

Using pure water as a test fluid, experiments gathered in the present have been performed within the following ranges:

#	Inlet water temperature, T_{in}	from 6.7 to 100.0 °C
#	Exit pressure, P_{ex}	about atmospheric pressure(= 0.1 MPa)
#	Tube diameter, D	from 1.0 to 6.0 mm
#	Heated length, L	from 4.0 to 680.0 mm
#	L/D ratio	from 1.0 to 113.3
#	Mass velocity, G	from 0 to 19,130 kg/m ² s
#	Critical heat flux. CHF	from 35.3 kW/m ² to 158.1 MW/m ²
#	Exit quality, X_{ex}	from -0.147 to over 1.0

Table 1.1 and 1.2 report the experimental ranges of the collected data.

PRESENTATION OF DATA

Experimental data for a total of 974 points, are grouped according to D or X_{ex} .

Group A ----- according to D .

A-1	$D = 1.0$ mm
A-2	$D = 2.0$ mm
A-3	$D = 2.2$ mm
A-4	$D = 4.0$ mm
A-5	$D = 6.0$ mm

Group B ----- according to X_{ex} .

B-1	$1 \leq X_{ex}$
B-2	$0 \leq X_{ex} < 1$
B-3	$X_{ex} < 0$

All experimental data refer to vertical orientation of tube in up-flow.

LIST OF SYMBOLS

CHF	Critical heat flux, MW/m ²
D	Tube diameter, mm
G	Mass velocity, kg/m ² s
L	Heated length, mm
L/D	Heated length/Tube diameter ratio, -
T_{in}	Inlet water temperature, °C
X_{ex}	Exit quality, -

ACKNOWLEDGMENT

The present collection of data was possible thanks to the co-operation of Prof. Mishima and Prof. Nishihara.

REFERENCES

1. Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, H. and Tasaka, K., Effect of Diameter and Heated Length on Critical Heat Flux for Water Flowing in Small-Diameter Tubes, *Trans. JSME Ser. B (in Japanese)*, **60**, 574, 2089 - 2094(1994).

2. Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, K., Critical Heat Flux for Flow-Boiling of Water in Small-Diameter Tubes under Low-Pressure Condition, *Trans. JSME Ser. B (in Japanese)*, **61**, 591, 4109 - 4116(1995).

3. Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, H. and Tasaka, K., Effect of Diameter and Heated Length on Critical Heat Flux for Water Flowing in Small-Diameter Tubes, *Heat Transfer - Japanese Research*, **23** (5), 415 - 426(1994).

4. Kureta, M., Mishima, K., Nishihara, K., Critical Heat Flux for Flow-Boiling of Water in Small-Diameter Tubes, *ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, Open Forum*, 31 (1995).

Table 1.1 Range of the collected experimental data

Group A-1 $D = 1.0\text{mm}$ Total 57 points		
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	0	19130.
CHF [MW/m ²]	0.719	158.1
X_{ex} [-]	-0.0777	$1 < X_{ex}$.
T_{in} [°C]	6.7	19.2
L/D [-]	5.	100.

Group A-2 $D = 2.0\text{mm}$ Total 60 points		
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	31.79	15650.
CHF [MW/m ²]	0.439	38.67
X_{ex} [-]	-0.1395	0.84
T_{in} [°C]	7.4	13.7
L/D [-]	5.	50.

Group A-3 $D = 2.2\text{mm}$ Total 44 points		
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	153.1	13310.
CHF [MW/m ²]	4.324	62.8
X_{ex} [-]	-0.120	0.40
T_{in} [°C]	10.5	15.4
L/D [-]	5.	51.4

Group A-4 $D = 4.0\text{mm}$ Total 120 points		
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	0.	3975.
CHF [MW/m ²]	0.06	38.8
X_{ex} [-]	-0.1473	$1 < X_{ex}$
T_{in} [°C]	7.4	15.6
L/D [-]	1.	50.

Group A-5 $D = 6.0\text{mm}$ Total 682 points		
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	0.	1962.
CHF [MW/m ²]	0.035	17.39
X_{ex} [-]	-0.0951	$1 < X_{ex}$
T_{in} [°C]	6.9	100.
L/D [-]	5.	113.3

Table 1.2 Range of the collected experimental data

Group B-1	$1 < X_{ex}$	Total 43 points
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	0.	146.1
CHF [MW/m ²]	0.035	6.477
X_{ex} [-]	1.0038	$1 < X_{ex}$
T_{in} [°C]	6.9	100.
D [mm]	1.0	6.0
L/D [-]	5.0	113.3

Group B-2	$0 \leq X_{ex} < 1$	Total 727 points
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	5.331	4105.
CHF [MW/m ²]	0.093	31.44
X_{ex} [-]	0.0005	.991
T_{in} [°C]	6.7	99.9
D [mm]	1.0	6.0
L/D [-]	1.0	113.3

Group B-3	$X_{ex} < 0$	Total 194 points
	Minimum	Maximum
G [kg/m ² s]	122.2	19130.
CHF [MW/m ²]	2.563	158.1
X_{ex} [-]	-0.1473	-0.0001
T_{in} [°C]	8.7	75.2
D [mm]	1.0	6.0
L/D [-]	1.0	51.4

Table 2
Collected Experimental Data

- Table 2.1 : Group A - 1**
- Table 2.2 : Group A - 2**
- Table 2.3 : Group A - 3**
- Table 2.4 : Group A - 4**
- Table 2.5 : Group A - 5**
- Table 2.6 : Group B - 1**
- Table 2.7 : Group B - 2**
- Table 2.8 : Group B - 3**

Table 2.1 Group A-1 [D = 1mm Tubes]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _m [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.797E+02	12.31	+0.4387	9.8	1.0	5.0	m1005s01	SUS316	0.5
3.911E+02	19.45	+0.2726	10.1	1.0	5.0	m1005s02	SUS316	0.5
6.012E+02	24.21	+0.1890	10.1	1.0	5.0	m1005s03	SUS316	0.5
8.131E+02	29.38	+0.1528	10.4	1.0	5.0	m1005s04	SUS316	0.5
1.025E+03	31.44	+0.1061	11.2	1.0	5.0	m1005s05	SUS316	0.5
1.234E+03	24.84	+0.0125	11.2	1.0	5.0	m1005s06	SUS316	0.5
1.445E+03	25.05	-0.0131	10.7	1.0	5.0	m1005s07	SUS316	0.5
1.236E+03	25.15	+0.0139	10.9	1.0	5.0	m1005s08	SUS316	0.5
0.000E+00	6.477	1<X _{ex}	11.7	1.0	5.0	m1005s09	SUS316	0.5
9.354E+02	22.15	+0.0446	11.5	1.0	5.0	m1005m01	SUS316	0.5
1.975E+03	32.99	-0.0173	11.5	1.0	5.0	m1005m02	SUS316	0.5
4.058E+03	46.09	-0.0645	11.6	1.0	5.0	m1005m03	SUS316	0.5
6.155E+03	62.73	-0.0737	12.2	1.0	5.0	m1005m04	SUS316	0.5
8.273E+03	92.83	-0.0638	12.6	1.0	5.0	m1005m05	SUS316	0.5
1.913E+04	158.1	-0.0777	19.2	1.0	5.0	m1005l01	SUS316	0.5
1.701E+02	5.141	+0.4165	7.5	1.0	11.0	m1010s01	SUS316	0.5
3.834E+02	8.244	+0.2469	7.8	1.0	11.0	m1010s02	SUS316	0.5
5.938E+02	9.946	+0.1552	8.3	1.0	11.0	m1010s03	SUS316	0.5
8.042E+02	7.084	+0.0012	8.7	1.0	11.0	m1010s04	SUS316	0.5
1.017E+03	12.56	+0.0704	8.8	1.0	11.0	m1010s05	SUS316	0.5
1.228E+03	9.884	-0.0125	9.3	1.0	11.0	m1010s06	SUS316	0.5
1.438E+03	10.11	-0.0322	9.4	1.0	11.0	m1010s07	SUS316	0.5
8.082E+02	7.402	+0.0097	9.6	1.0	11.0	m1010s08	SUS316	0.5
1.233E+03	9.046	-0.0247	10.2	1.0	11.0	m1010s09	SUS316	0.5
8.892E+02	7.323	-0.0100	8.7	1.0	11.0	m1010m01	SUS316	0.5
1.943E+03	10.72	-0.0609	9.8	1.0	11.0	m1010m02	SUS316	0.5
4.075E+03	19.03	-0.0739	11.7	1.0	11.0	m1010m03	SUS316	0.5
6.179E+03	28.89	-0.0723	12.5	1.0	11.0	m1010m04	SUS316	0.5
1.671E+02	2.781	+0.5630	6.7	1.0	25.0	m1025s01	SUS316	0.5
3.736E+02	5.430	+0.4719	7.8	1.0	25.0	m1025s02	SUS316	0.5
5.802E+02	7.125	+0.3715	7.6	1.0	25.0	m1025s03	SUS316	0.5
7.866E+02	8.088	+0.2833	7.8	1.0	25.0	m1025s04	SUS316	0.5
9.943E+02	9.002	+0.2301	8.4	1.0	25.0	m1025s05	SUS316	0.5
1.201E+03	9.514	+0.1803	8.6	1.0	25.0	m1025s06	SUS316	0.5
1.409E+03	10.28	+0.1537	9.2	1.0	25.0	m1025s07	SUS316	0.5
9.087E+02	8.360	+0.2371	8.7	1.0	25.0	m1025m01	SUS316	0.5
1.967E+03	11.76	+0.0961	9.6	1.0	25.0	m1025m02	SUS316	0.5
4.105E+03	16.80	+0.0153	11.1	1.0	25.0	m1025m03	SUS316	0.5
6.222E+03	22.16	-0.0071	11.7	1.0	25.0	m1025m04	SUS316	0.5
8.337E+03	27.01	-0.0210	11.9	1.0	25.0	m1025m05	SUS316	0.5
3.780E+02	3.205	+0.5809	8.7	1.0	50.0	m1050s02	SUS316	0.5
5.838E+02	4.595	+0.5276	9.0	1.0	50.0	m1050s03	SUS316	0.5
7.894E+02	5.962	+0.4982	8.4	1.0	50.0	m1050s04	SUS316	0.5
9.968E+02	6.788	+0.4329	8.7	1.0	50.0	m1050s05	SUS316	0.5
1.411E+03	6.843	+0.2602	9.2	1.0	50.0	m1050s07	SUS316	0.5
9.087E+02	6.056	+0.4210	9.2	1.0	50.0	m1050m01	SUS316	0.5
1.971E+03	9.534	+0.2601	9.8	1.0	50.0	m1050m02	SUS316	0.5
4.095E+03	11.09	+0.0734	10.8	1.0	50.0	m1050m03	SUS316	0.5
1.293E+02	.719	+0.8132	7.8	1.0	100.0	m1100s01	SUS316	0.5
1.726E+02	.966	+0.8209	8.2	1.0	100.0	m1100s02	SUS316	0.5
2.151E+02	1.200	+0.8179	8.4	1.0	100.0	m1100s03	SUS316	0.5
2.576E+02	1.452	+0.8275	8.1	1.0	100.0	m1100s04	SUS316	0.5
2.993E+02	1.734	+0.8556	8.4	1.0	100.0	m1100s05	SUS316	0.5
3.834E+02	2.045	+0.7740	8.2	1.0	100.0	m1100s06	SUS316	0.5
4.672E+02	2.314	+0.7062	8.0	1.0	100.0	m1100s07	SUS316	0.5
5.930E+02	2.808	+0.6686	8.6	1.0	100.0	m1100s08	SUS316	0.5
1.436E+03	4.161	+0.3429	8.6	1.0	100.0	m1100s09	SUS316	0.5

Table 2.2 Group A-2 [D = 2mm Tubes]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _m [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
3.179E+01	2.869	+0.6267	7.4	2.0	5.0	m2005s01	SUS316	0.5
4.241E+01	3.019	+0.4580	7.5	2.0	5.0	m2005s02	SUS316	0.5
5.314E+01	3.143	+0.3517	7.7	2.0	5.0	m2005s03	SUS316	0.5
7.428E+01	3.331	+0.2257	8.1	2.0	5.0	m2005s04	SUS316	0.5
9.500E+01	3.571	+0.1614	8.1	2.0	5.0	m2005s05	SUS316	0.5
1.159E+02	3.641	+0.1063	7.9	2.0	5.0	m2005s06	SUS316	0.5
1.476E+02	3.898	+0.0620	7.9	2.0	5.0	m2005s07	SUS316	0.5
2.009E+02	4.511	+0.0284	8.7	2.0	5.0	m2005s08	SUS316	0.5
2.550E+02	5.348	+0.0181	10.2	2.0	5.0	m2005s09	SUS316	0.5
3.087E+02	5.965	+0.0041	10.5	2.0	5.0	m2005s10	SUS316	0.5
3.620E+02	5.903	-0.0221	10.8	2.0	5.0	m2005s11	SUS316	0.5
2.290E+02	4.625	+0.0103	9.7	2.0	5.0	m2005m01	SUS316	0.5
4.892E+02	6.137	-0.0570	10.0	2.0	5.0	m2005m02	SUS316	0.5
7.534E+02	6.796	-0.0871	10.6	2.0	5.0	m2005m03	SUS316	0.5
1.017E+03	8.457	-0.0922	11.2	2.0	5.0	m2005m04	SUS316	0.5
1.283E+03	9.710	-0.0975	11.9	2.0	5.0	m2005m05	SUS316	0.5
1.545E+03	10.59	-0.1033	12.2	2.0	5.0	m2005m06	SUS316	0.5
2.065E+03	14.72	-0.1007	12.3	2.0	5.0	m2005m07	SUS316	0.5
1.565E+04	38.67	-0.1395	13.6	2.0	5.0	m2005l01	SUS316	0.5
4.609E+01	1.949	+0.5849	12.0	2.0	10.0	m2010s01	SUS316	0.5
9.863E+01	3.223	+0.4149	12.1	2.0	10.0	m2010s02	SUS316	0.5
1.511E+02	4.003	+0.3057	12.2	2.0	10.0	m2010s03	SUS316	0.5
2.036E+02	4.423	+0.2195	11.4	2.0	10.0	m2010s04	SUS316	0.5
2.562E+02	4.613	+0.1541	11.7	2.0	10.0	m2010s05	SUS316	0.5
3.092E+02	4.857	+0.1134	11.7	2.0	10.0	m2010s06	SUS316	0.5
3.620E+02	4.977	+0.0787	11.7	2.0	10.0	m2010s07	SUS316	0.5
2.401E+02	4.691	+0.1824	12.3	2.0	10.0	m2010m01	SUS316	0.5
5.016E+02	5.308	+0.0237	12.3	2.0	10.0	m2010m02	SUS316	0.5
1.025E+03	7.525	-0.0331	12.6	2.0	10.0	m2010m03	SUS316	0.5
1.552E+03	9.298	-0.0563	13.0	2.0	10.0	m2010m04	SUS316	0.5
2.073E+03	11.27	-0.0664	12.9	2.0	10.0	m2010m05	SUS316	0.5
2.341E+03	11.91	-0.0720	13.2	2.0	10.0	m2010m06	SUS316	0.5
2.641E+03	13.14	-0.0739	13.2	2.0	10.0	m2010l01	SUS316	0.5
5.229E+03	19.36	-0.0989	11.9	2.0	10.0	m2010l02	SUS316	0.5
7.827E+03	23.26	-0.1114	12.2	2.0	10.0	m2010l03	SUS316	0.5
1.047E+04	26.70	-0.1162	13.6	2.0	10.0	m2010l04	SUS316	0.5
9.573E+01	1.582	+0.5649	10.3	2.0	25.0	m2025s02	SUS316	0.5
1.473E+02	2.229	+0.5028	10.3	2.0	25.0	m2025s03	SUS316	0.5
1.990E+02	2.799	+0.4553	10.2	2.0	25.0	m2025s04	SUS316	0.5
2.507E+02	3.113	+0.3823	10.2	2.0	25.0	m2025s05	SUS316	0.5
3.025E+02	3.451	+0.3376	10.1	2.0	25.0	m2025s06	SUS316	0.5
3.547E+02	3.714	+0.2962	10.2	2.0	25.0	m2025s07	SUS316	0.5
2.325E+02	2.784	+0.3637	10.7	2.0	25.0	m2025m01	SUS316	0.5
4.967E+02	4.199	+0.2087	11.2	2.0	25.0	m2025m02	SUS316	0.5
1.027E+03	5.411	+0.0691	12.0	2.0	25.0	m2025m03	SUS316	0.5
1.557E+03	5.991	+0.0068	12.4	2.0	25.0	m2025m04	SUS316	0.5
2.085E+03	6.919	-0.0170	12.2	2.0	25.0	m2025m05	SUS316	0.5
2.353E+03	7.392	-0.0237	12.8	2.0	25.0	m2025m06	SUS316	0.5
2.650E+03	8.010	-0.0282	13.2	2.0	25.0	m2025l01	SUS316	0.5
5.299E+03	13.28	-0.0502	13.7	2.0	25.0	m2025l02	SUS316	0.5
4.388E+01	.439	+0.7159	8.8	2.0	50.0	m2050s01	SUS316	0.5
9.639E+01	1.097	+0.8380	8.7	2.0	50.0	m2050s02	SUS316	0.5
1.490E+02	1.579	+0.7694	9.0	2.0	50.0	m2050s03	SUS316	0.5
2.014E+02	2.091	+0.7498	8.7	2.0	50.0	m2050s04	SUS316	0.5
2.543E+02	2.495	+0.6988	8.7	2.0	50.0	m2050s05	SUS316	0.5
3.071E+02	2.752	+0.6252	9.6	2.0	50.0	m2050s06	SUS316	0.5
3.597E+02	3.149	+0.6066	9.4	2.0	50.0	m2050s07	SUS316	0.5
2.261E+02	2.220	+0.7009	9.5	2.0	50.0	m2050m01	SUS316	0.5
4.859E+02	3.339	+0.4400	9.5	2.0	50.0	m2050m02	SUS316	0.5
1.016E+03	5.389	+0.3041	11.1	2.0	50.0	m2050m08	SUS316	0.5

Table 2.3 Group A-3 [D = 2.2mm Tubes]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.012E+03	14.43	-0.0408	10.5	2.2	5.0	ks10dh01	Nickel	0.5
2.006E+03	21.25	-0.0729	10.7	2.2	5.0	ks10dh02	Nickel	0.5
2.053E+02	4.324	+0.0250	13.5	2.2	5.0	ks10gl03	Nickel	0.5
4.066E+02	8.103	+0.0180	15.1	2.2	5.0	ks10gl04	Nickel	0.5
5.994E+02	10.94	+0.0005	13.7	2.2	5.0	ks10gl05	Nickel	0.5
7.966E+02	14.07	-0.0099	10.9	2.2	5.0	ks10gl06	Nickel	0.5
1.531E+02	5.341	+0.1459	12.6	2.2	5.0	ks10gl07	Nickel	0.5
3.018E+02	6.553	+0.0278	11.9	2.2	5.0	ks10gl08	Nickel	0.5
4.988E+02	9.307	+0.0040	13.6	2.2	5.0	ks10gl09	Nickel	0.5
1.312E+04	61.28	-0.1200	13.6	2.2	5.0	ks10gh03	Nickel	0.5
4.992E+03	38.12	-0.0941	13.4	2.2	5.0	ks10gh04	Nickel	0.5
8.054E+03	50.34	-0.1055	13.9	2.2	5.0	ks10gh05	Nickel	0.5
1.007E+04	62.80	-0.1048	14.3	2.2	5.0	ks10gh06	Nickel	0.5
3.013E+03	33.09	-0.0652	13.0	2.2	5.0	ks10gh07	Nickel	0.5
1.493E+03	24.13	-0.0208	12.2	2.2	5.0	ks10gh08	Nickel	0.5
1.007E+03	17.15	-0.0150	11.2	2.2	5.0	ks10gh09	Nickel	0.5
2.023E+03	13.09	-0.0495	12.1	2.2	10.0	ks10ch02	Nickel	0.5
7.061E+03	22.71	-0.1085	11.4	2.2	10.0	ks10ch04	Nickel	0.5
1.017E+04	33.13	-0.1053	12.7	2.2	10.0	ks10ch05	Nickel	0.5
1.331E+04	44.12	-0.1010	14.5	2.2	10.0	ks10ch06	Nickel	0.5
1.476E+03	10.56	-0.0382	11.7	2.2	10.0	ks10ch07	Nickel	0.5
2.996E+03	21.09	-0.0408	11.4	2.2	10.0	ks10ch08	Nickel	0.5
5.024E+03	27.19	-0.0688	11.8	2.2	10.0	ks10ch09	Nickel	0.5
8.007E+03	34.06	-0.0884	12.3	2.2	10.0	ks10ch10	Nickel	0.5
9.053E+03	35.10	-0.0929	13.5	2.2	10.0	ks10ch11	Nickel	0.5
1.108E+04	38.22	-0.1014	13.0	2.2	10.0	ks10ch12	Nickel	0.5
1.210E+04	40.14	-0.1026	13.6	2.2	10.0	ks10ch13	Nickel	0.5
6.018E+03	27.33	-0.0830	12.5	2.2	10.0	ks10ch14	Nickel	0.5
9.984E+02	6.981	+0.1436	11.0	2.2	25.0	ks10fh01	Nickel	0.5
1.489E+03	8.997	+0.1037	12.2	2.2	25.0	ks10fh02	Nickel	0.5
1.966E+03	8.658	+0.0332	13.3	2.2	25.0	ks10fh03	Nickel	0.5
2.724E+03	7.910	+0.1030	13.5	2.2	51.4	ks10eh08	Nickel	0.5
8.976E+02	5.539	+0.3957	10.9	2.2	51.4	ks10eh09	Nickel	0.5
2.387E+03	7.138	+0.1083	12.1	2.2	51.4	ks10eh14	Nickel	0.5
1.454E+03	6.255	+0.2261	11.2	2.2	51.4	ks10eh15	Nickel	0.5
1.217E+03	5.645	+0.2553	10.5	2.2	51.4	ks10eh16	Nickel	0.5
1.935E+03	6.372	+0.1353	11.9	2.2	51.4	ks10eh17	Nickel	0.5
2.474E+03	7.301	+0.1037	11.6	2.2	51.4	ks10eh18	Nickel	0.5
3.454E+03	7.010	+0.0224	13.0	2.2	51.4	ks10eh19	Nickel	0.5
3.884E+03	8.051	+0.0257	12.7	2.2	51.4	ks10eh20	Nickel	0.5
4.917E+03	8.239	-0.0089	13.5	2.2	51.4	ks10eh21	Nickel	0.5
5.983E+03	8.763	-0.0311	11.9	2.2	51.4	ks10eh22	Nickel	0.5
7.156E+03	10.41	-0.0306	12.7	2.2	51.4	ks10eh23	Nickel	0.5
1.328E+04	13.57	-0.0649	15.4	2.2	51.4	ks10eh24	Nickel	0.5

Table 2.4 Group A-4 [D = 4mm Tubes]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.006E+02	2.940	+0.0962	12.9	4.0	5.0	ks104a01	Nickel	0.25
1.006E+02	3.050	+0.1052	12.5	4.0	5.0	ks104a02	Nickel	0.25
1.986E+02	4.361	+0.0283	11.0	4.0	5.0	ks104a03	Nickel	0.25
5.162E+01	2.176	+0.2107	12.8	4.0	5.0	ks104a04	Nickel	0.25
4.102E+01	2.041	+0.2785	13.0	4.0	5.0	ks104a05	Nickel	0.25
2.980E+02	4.567	-0.0286	12.0	4.0	5.0	ks104a06	Nickel	0.25
4.000E+02	5.548	-0.0422	11.6	4.0	5.0	ks104a07	Nickel	0.25
1.006E+02	2.002	+0.1846	10.0	4.0	10.0	ks104b02	Nickel	0.25
2.023E+02	2.483	+0.0494	10.0	4.0	10.0	ks104b03	Nickel	0.25
3.032E+02	1.639	+0.0743	11.6	4.0	25.0	ks104c02	Nickel	0.25
9.935E+02	3.002	-0.0272	13.8	4.0	25.0	ks104c03	Nickel	0.25
2.001E+03	5.279	-0.0450	13.3	4.0	25.0	ks104c04	Nickel	0.25
2.634E+02	1.944	+0.4879	11.1	4.0	50.0	ks104d01	Nickel	0.25
4.848E+02	2.409	+0.2757	11.9	4.0	50.0	ks104d02	Nickel	0.25
8.445E+00	5.015	+0.8832	9.4	4.0	1.0	m4001s01	SUS316	1.0
1.105E+01	5.417	+0.7003	9.8	4.0	1.0	m4001s02	SUS316	1.0
1.373E+01	5.629	+0.5583	10.0	4.0	1.0	m4001s03	SUS316	1.0
1.634E+01	5.617	+0.4403	9.5	4.0	1.0	m4001s04	SUS316	1.0
1.905E+01	5.765	+0.3679	9.8	4.0	1.0	m4001s05	SUS316	1.0
2.431E+01	6.147	+0.2806	10.3	4.0	1.0	m4001s06	SUS316	1.0
2.941E+01	6.571	+0.2275	9.8	4.0	1.0	m4001s07	SUS316	1.0
3.736E+01	6.896	+0.1583	9.6	4.0	1.0	m4001s08	SUS316	1.0
5.051E+01	7.818	+0.1054	9.6	4.0	1.0	m4001s09	SUS316	1.0
6.364E+01	8.518	+0.0683	9.6	4.0	1.0	m4001s10	SUS316	1.0
7.676E+01	9.132	+0.0429	10.1	4.0	1.0	m4001s11	SUS316	1.0
8.995E+01	9.712	+0.0240	10.4	4.0	1.0	m4001s12	SUS316	1.0
5.702E+01	7.789	+0.0740	10.0	4.0	1.0	m4001m01	SUS316	1.0
1.222E+02	10.47	-0.0166	9.8	4.0	1.0	m4001m02	SUS316	1.0
1.481E+02	10.97	-0.0359	10.5	4.0	1.0	m4001m03	SUS316	1.0
1.877E+02	11.98	-0.0540	10.5	4.0	1.0	m4001m04	SUS316	1.0
2.541E+02	13.95	-0.0684	11.3	4.0	1.0	m4001m05	SUS316	1.0
3.221E+02	15.51	-0.0775	12.8	4.0	1.0	m4001m06	SUS316	1.0
3.855E+02	16.39	-0.0889	12.1	4.0	1.0	m4001m07	SUS316	1.0
4.493E+02	17.49	-0.0960	11.7	4.0	1.0	m4001m08	SUS316	1.0
5.150E+02	17.75	-0.1035	11.9	4.0	1.0	m4001m09	SUS316	1.0
5.818E+02	18.34	-0.1076	12.5	4.0	1.0	m4001m10	SUS316	1.0
6.595E+02	21.46	-0.1065	12.1	4.0	1.0	m4001i01	SUS316	1.0
9.188E+02	24.64	-0.1161	12.4	4.0	1.0	m4001i02	SUS316	1.0
1.305E+03	25.96	-0.1293	11.9	4.0	1.0	m4001i03	SUS316	1.0
3.891E+03	38.80	-0.1473	11.7	4.0	1.0	m4001i04	SUS316	1.0
2.611E+03	35.69	-0.1366	13.9	4.0	1.0	m4001i05	SUS316	1.0
1.147E+01	1.404	+0.9183	11.0	4.0	5.0	m4005s01	SUS316	1.0
2.466E+01	2.205	+0.6273	11.5	4.0	5.0	m4005s02	SUS316	1.0
3.785E+01	2.435	+0.4043	11.2	4.0	5.0	m4005s03	SUS316	1.0
5.095E+01	2.539	+0.2761	11.4	4.0	5.0	m4005s04	SUS316	1.0
6.417E+01	2.680	+0.2043	11.3	4.0	5.0	m4005s05	SUS316	1.0
7.751E+01	2.779	+0.1526	11.6	4.0	5.0	m4005s06	SUS316	1.0
9.058E+01	2.879	+0.1165	11.6	4.0	5.0	m4005s07	SUS316	1.0
5.955E+01	2.570	+0.2175	11.7	4.0	5.0	m4005m01	SUS316	1.0
1.244E+02	3.132	+0.0582	11.7	4.0	5.0	m4005m02	SUS316	1.0
2.554E+02	4.314	-0.0149	11.9	4.0	5.0	m4005m03	SUS316	1.0
3.864E+02	5.634	-0.0354	11.9	4.0	5.0	m4005m04	SUS316	1.0
5.184E+02	6.885	-0.0454	12.7	4.0	5.0	m4005m05	SUS316	1.0
5.821E+02	7.371	-0.0514	12.4	4.0	5.0	m4005m06	SUS316	1.0
6.600E+02	7.925	-0.0569	12.6	4.0	5.0	m4005i01	SUS316	1.0
1.309E+03	11.84	-0.0820	13.2	4.0	5.0	m4005i02	SUS316	1.0
1.958E+03	14.18	-0.0982	13.1	4.0	5.0	m4005i03	SUS316	1.0
3.912E+03	22.40	-0.1107	13.6	4.0	5.0	m4005i06	SUS316	1.0
1.100E+01	.572	+0.7531	9.8	4.0	10.0	m4010s01	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
2.426E+01	1.217	+0.7210	9.9	4.0	10.0	m4010s02	SUS316	1.0
3.747E+01	1.579	+0.5786	9.9	4.0	10.0	m4010s03	SUS316	1.0
5.065E+01	1.774	+0.4528	10.1	4.0	10.0	m4010s04	SUS316	1.0
6.392E+01	1.976	+0.3810	10.6	4.0	10.0	m4010s05	SUS316	1.0
7.722E+01	2.106	+0.3174	11.1	4.0	10.0	m4010s06	SUS316	1.0
9.053E+01	2.226	+0.2704	11.5	4.0	10.0	m4010s07	SUS316	1.0
5.967E+01	1.823	+0.3771	12.0	4.0	10.0	m4010m01	SUS316	1.0
1.250E+02	2.355	+0.1694	11.9	4.0	10.0	m4010m02	SUS316	1.0
2.567E+02	3.091	+0.0500	12.5	4.0	10.0	m4010m03	SUS316	1.0
3.855E+02	3.734	+0.0069	11.8	4.0	10.0	m4010m04	SUS316	1.0
5.171E+02	4.117	-0.0214	13.0	4.0	10.0	m4010m05	SUS316	1.0
5.818E+02	4.450	-0.0279	12.5	4.0	10.0	m4010m06	SUS316	1.0
6.600E+02	4.724	-0.0351	13.3	4.0	10.0	m4010l01	SUS316	1.0
1.307E+03	7.518	-0.0610	12.8	4.0	10.0	m4010l02	SUS316	1.0
1.951E+03	10.29	-0.0712	11.8	4.0	10.0	m4010l03	SUS316	1.0
3.914E+03	16.06	-0.0894	13.2	4.0	10.0	m4010l06	SUS316	1.0
0.000E+00	.113	1<X _{ex}	11.3	4.0	25.0	m4025s01	SUS316	1.0
1.129E+01	.176	+0.5243	11.7	4.0	25.0	m4025s02	SUS316	1.0
2.365E+01	.399	+0.5787	9.5	4.0	25.0	m4025s03	SUS316	1.0
3.661E+01	.692	+0.6688	9.5	4.0	25.0	m4025s04	SUS316	1.0
4.958E+01	.964	+0.6922	9.3	4.0	25.0	m4025s05	SUS316	1.0
6.257E+01	1.142	+0.6398	9.6	4.0	25.0	m4025s06	SUS316	1.0
7.574E+01	1.291	+0.5871	9.9	4.0	25.0	m4025s07	SUS316	1.0
8.877E+01	1.468	+0.5661	10.8	4.0	25.0	m4025s08	SUS316	1.0
8.886E+01	1.447	+0.5546	10.7	4.0	25.0	m4025s09	SUS316	1.0
5.905E+01	.899	+0.5088	11.5	4.0	25.0	m4025m01	SUS316	1.0
1.252E+02	1.728	+0.4457	11.1	4.0	25.0	m4025m02	SUS316	1.0
2.578E+02	2.461	+0.2594	12.4	4.0	25.0	m4025m03	SUS316	1.0
3.898E+02	3.042	+0.1819	12.3	4.0	25.0	m4025m04	SUS316	1.0
5.213E+02	3.405	+0.1262	12.6	4.0	25.0	m4025m05	SUS316	1.0
5.861E+02	3.523	+0.1023	12.2	4.0	25.0	m4025m06	SUS316	1.0
6.626E+02	3.522	+0.0704	11.6	4.0	25.0	m4025l01	SUS316	1.0
1.325E+03	4.118	-0.0243	13.3	4.0	25.0	m4025l02	SUS316	1.0
1.987E+03	5.212	-0.0441	14.2	4.0	25.0	m4025l03	SUS316	1.0
2.649E+03	6.269	-0.0536	15.2	4.0	25.0	m4025l04	SUS316	1.0
3.311E+03	7.293	-0.0604	15.4	4.0	25.0	m4025l05	SUS316	1.0
3.973E+03	8.360	-0.0644	15.6	4.0	25.0	m4025l06	SUS316	1.0
3.312E+03	7.318	-0.0626	14.1	4.0	25.0	m4025l07	SUS316	1.0
0.000E+00	.066	1<X _{ex}	8.1	4.0	50.0	m4050s01	SUS316	1.0
1.054E+01	.104	+0.7011	7.4	4.0	50.0	m4050s02	SUS316	1.0
2.351E+01	.216	+0.6420	8.0	4.0	50.0	m4050s03	SUS316	1.0
3.630E+01	.359	+0.7056	8.5	4.0	50.0	m4050s04	SUS316	1.0
4.930E+01	.565	+0.8442	8.2	4.0	50.0	m4050s05	SUS316	1.0
6.214E+01	.737	+0.8798	8.1	4.0	50.0	m4050s06	SUS316	1.0
7.510E+01	.879	+0.8655	7.9	4.0	50.0	m4050s07	SUS316	1.0
8.831E+01	1.002	+0.8354	9.0	4.0	50.0	m4050s08	SUS316	1.0
0.000E+00	.060	1<X _{ex}	7.8	4.0	50.0	m4050s09	SUS316	1.0
6.199E+01	.736	+0.8814	8.3	4.0	50.0	m4050s10	SUS316	1.0
5.502E+01	.584	+0.7683	7.8	4.0	50.0	m4050m01	SUS316	1.0
1.215E+02	1.282	+0.7646	8.9	4.0	50.0	m4050m02	SUS316	1.0
2.550E+02	2.065	+0.5495	10.1	4.0	50.0	m4050m03	SUS316	1.0
3.873E+02	2.682	+0.4473	11.0	4.0	50.0	m4050m04	SUS316	1.0
5.200E+02	2.863	+0.3227	11.5	4.0	50.0	m4050m05	SUS316	1.0
5.855E+02	3.004	+0.2907	12.2	4.0	50.0	m4050m06	SUS316	1.0
6.627E+02	3.208	+0.2637	11.5	4.0	50.0	m4050l01	SUS316	1.0
1.325E+03	4.918	+0.1655	12.5	4.0	50.0	m4050l02	SUS316	1.0
1.987E+03	5.947	+0.1044	13.9	4.0	50.0	m4050l03	SUS316	1.0
2.650E+03	6.608	+0.0575	12.5	4.0	50.0	m4050l04	SUS316	1.0
3.312E+03	7.310	+0.0342	13.6	4.0	50.0	m4050l05	SUS316	1.0
3.975E+03	7.321	+0.0007	13.0	4.0	50.0	m4050l06	SUS316	1.0
3.974E+03	7.359	+0.0027	13.6	4.0	50.0	m4050l07	SUS316	1.0

Table 2.5 Group A-5 [D = 6mm Tubes]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
5.001E+00	.806	+1.2937	28.2	6.0	5.0	k6005a01	SUS316	1.0
5.022E+00	.776	+1.2651	44.0	6.0	5.0	k6005a02	SUS316	1.0
5.032E+00	.761	+1.3180	88.2	6.0	5.0	k6005a03	SUS316	1.0
5.012E+00	.808	+1.3938	80.9	6.0	5.0	k6005a04	SUS316	1.0
4.992E+00	.772	+1.3459	86.8	6.0	5.0	k6005a05	SUS316	1.0
3.077E+01	2.659	+0.6100	16.6	6.0	5.0	k6005b01	SUS316	1.0
3.070E+01	2.646	+0.6149	20.3	6.0	5.0	k6005b02	SUS316	1.0
3.057E+01	2.657	+0.6288	24.3	6.0	5.0	k6005b03	SUS316	1.0
3.052E+01	2.248	+0.5334	36.1	6.0	5.0	k6005b04	SUS316	1.0
3.054E+01	2.578	+0.6239	33.5	6.0	5.0	k6005b05	SUS316	1.0
3.047E+01	2.651	+0.6553	38.1	6.0	5.0	k6005b06	SUS316	1.0
3.052E+01	2.632	+0.6603	44.3	6.0	5.0	k6005b07	SUS316	1.0
3.048E+01	2.623	+0.6652	47.9	6.0	5.0	k6005b08	SUS316	1.0
3.040E+01	2.596	+0.6748	56.2	6.0	5.0	k6005b09	SUS316	1.0
3.035E+01	2.584	+0.6769	58.5	6.0	5.0	k6005b10	SUS316	1.0
3.033E+01	2.569	+0.6854	65.2	6.0	5.0	k6005b11	SUS316	1.0
3.638E+01	2.842	+0.6385	71.2	6.0	5.0	k6005b12	SUS316	1.0
4.010E+01	2.420	+0.4940	78.1	6.0	5.0	k6005b13	SUS316	1.0
4.045E+01	1.954	+0.3959	82.8	6.0	5.0	k6005b14	SUS316	1.0
3.864E+01	1.908	+0.3855	72.1	6.0	5.0	k6005b15	SUS316	1.0
3.883E+01	1.669	+0.3335	74.6	6.0	5.0	k6005b16	SUS316	1.0
3.881E+01	1.592	+0.3271	80.5	6.0	5.0	k6005b17	SUS316	1.0
3.645E+01	1.932	+0.4090	67.4	6.0	5.0	k6005b18	SUS316	1.0
3.739E+01	1.624	+0.3434	77.7	6.0	5.0	k6005b19	SUS316	1.0
3.855E+01	1.400	+0.2831	79.2	6.0	5.0	k6005b20	SUS316	1.0
3.797E+01	1.236	+0.2613	85.4	6.0	5.0	k6005b21	SUS316	1.0
3.728E+01	1.140	+0.2557	91.8	6.0	5.0	k6005b22	SUS316	1.0
3.791E+01	1.050	+0.2382	96.2	6.0	5.0	k6005b23	SUS316	1.0
3.789E+01	.971	+0.2251	99.0	6.0	5.0	k6005b24	SUS316	1.0
3.724E+01	1.462	+0.4143	76.2	6.0	5.0	k6005b25	SUS316	1.0
3.993E+01	1.586	+0.4726	83.3	6.0	5.0	k6005b26	SUS316	1.0
3.975E+01	1.491	+0.4496	87.5	6.0	5.0	k6005b27	SUS316	1.0
3.967E+01	1.003	+0.2988	89.7	6.0	5.0	k6005b28	SUS316	1.0
3.944E+01	.922	+0.2836	95.5	6.0	5.0	k6005b29	SUS316	1.0
1.866E+01	2.145	+0.8622	16.2	6.0	5.0	k6005c01	SUS316	1.0
1.866E+01	2.197	+0.8982	22.1	6.0	5.0	k6005c02	SUS316	1.0
1.868E+01	2.221	+0.9137	25.3	6.0	5.0	k6005c03	SUS316	1.0
1.879E+01	2.207	+0.9118	31.1	6.0	5.0	k6005c04	SUS316	1.0
1.881E+01	2.217	+0.9252	36.0	6.0	5.0	k6005c05	SUS316	1.0
1.885E+01	2.147	+0.8998	41.3	6.0	5.0	k6005c06	SUS316	1.0
1.890E+01	2.136	+0.8917	41.3	6.0	5.0	k6005c07	SUS316	1.0
1.918E+01	2.147	+0.8944	47.9	6.0	5.0	k6005c08	SUS316	1.0
1.987E+01	2.206	+0.8918	50.7	6.0	5.0	k6005c09	SUS316	1.0
2.218E+01	2.284	+0.8258	53.6	6.0	5.0	k6005c10	SUS316	1.0
2.230E+01	2.295	+0.8402	61.5	6.0	5.0	k6005c11	SUS316	1.0
2.236E+01	2.273	+0.8384	66.6	6.0	5.0	k6005c12	SUS316	1.0
2.374E+01	2.256	+0.7868	70.2	6.0	5.0	k6005c13	SUS316	1.0
2.436E+01	2.078	+0.7196	80.5	6.0	5.0	k6005c14	SUS316	1.0
2.456E+01	2.038	+0.7094	86.1	6.0	5.0	k6005c15	SUS316	1.0
2.461E+01	1.998	+0.6965	87.8	6.0	5.0	k6005c16	SUS316	1.0
2.464E+01	1.301	+0.4590	95.2	6.0	5.0	k6005c17	SUS316	1.0
2.462E+01	.871	+0.3086	97.4	6.0	5.0	k6005c18	SUS316	1.0
2.465E+01	2.195	+0.7321	69.4	6.0	5.0	k6005c19	SUS316	1.0
2.468E+01	2.122	+0.7148	74.8	6.0	5.0	k6005c20	SUS316	1.0
2.575E+01	.963	+0.2682	83.7	6.0	5.0	k6005c21	SUS316	1.0
2.555E+01	1.115	+0.3217	83.5	6.0	5.0	k6005c22	SUS316	1.0
2.514E+01	1.121	+0.3124	77.9	6.0	5.0	k6005c23	SUS316	1.0
2.503E+01	1.257	+0.3413	70.5	6.0	5.0	k6005c24	SUS316	1.0
2.512E+01	1.103	+0.2925	70.3	6.0	5.0	k6005c25	SUS316	1.0
2.512E+01	.942	+0.2688	88.1	6.0	5.0	k6005c26	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
2.510E+01	.857	+0.2495	91.8	6.0	5.0	k6005c27	SUS316	1.0
2.514E+01	.846	+0.2581	95.2	6.0	5.0	k6005c28	SUS316	1.0
2.518E+01	.809	+0.2483	96.3	6.0	5.0	k6005c29	SUS316	1.0
2.510E+01	.859	+0.2680	98.5	6.0	5.0	k6005c30	SUS316	1.0
4.252E+01	3.242	+0.5184	15.9	6.0	5.0	k6005d01	SUS316	1.0
4.252E+01	3.126	+0.5053	21.8	6.0	5.0	k6005d02	SUS316	1.0
4.251E+01	3.231	+0.5384	27.6	6.0	5.0	k6005d03	SUS316	1.0
4.251E+01	3.207	+0.5365	29.3	6.0	5.0	k6005d04	SUS316	1.0
4.247E+01	3.225	+0.5520	35.2	6.0	5.0	k6005d05	SUS316	1.0
4.233E+01	3.078	+0.5335	40.6	6.0	5.0	k6005d06	SUS316	1.0
4.233E+01	3.291	+0.5868	45.3	6.0	5.0	k6005d07	SUS316	1.0
4.434E+01	3.281	+0.5634	50.6	6.0	5.0	k6005d08	SUS316	1.0
4.670E+01	3.333	+0.5558	59.0	6.0	5.0	k6005d09	SUS316	1.0
4.757E+01	3.377	+0.5446	54.8	6.0	5.0	k6005d10	SUS316	1.0
5.097E+01	3.543	+0.5564	68.1	6.0	5.0	k6005d11	SUS316	1.0
5.100E+01	3.376	+0.5329	71.3	6.0	5.0	k6005d12	SUS316	1.0
5.228E+01	3.336	+0.5307	81.4	6.0	5.0	k6005d13	SUS316	1.0
5.281E+01	2.606	+0.3957	77.7	6.0	5.0	k6005d14	SUS316	1.0
5.293E+01	2.410	+0.3808	87.8	6.0	5.0	k6005d15	SUS316	1.0
5.321E+01	1.731	+0.2751	92.9	6.0	5.0	k6005d16	SUS316	1.0
5.447E+01	3.010	+0.4769	93.2	6.0	5.0	k6005d17	SUS316	1.0
4.963E+01	3.315	+0.9678	62.6	6.0	5.0	k6005d18	SUS316	1.0
4.988E+01	3.260	+0.9593	66.8	6.0	5.0	k6005d19	SUS316	1.0
5.016E+01	3.362	+1.0038	72.9	6.0	5.0	k6005d20	SUS316	1.0
5.034E+01	3.218	+0.9452	76.4	6.0	5.0	k6005d21	SUS316	1.0
5.032E+01	3.112	+0.9369	78.8	6.0	5.0	k6005d22	SUS316	1.0
5.043E+01	2.056	+0.6122	82.3	6.0	5.0	k6005d23	SUS316	1.0
5.043E+01	2.363	+0.7113	83.7	6.0	5.0	k6005d24	SUS316	1.0
5.041E+01	2.289	+0.6925	86.2	6.0	5.0	k6005d25	SUS316	1.0
5.039E+01	2.115	+0.6402	87.5	6.0	5.0	k6005d26	SUS316	1.0
5.158E+01	2.095	+0.6416	90.0	6.0	5.0	k6005d27	SUS316	1.0
5.256E+01	1.712	+0.5265	92.0	6.0	5.0	k6005d28	SUS316	1.0
5.308E+01	1.529	+0.4708	92.6	6.0	5.0	k6005d29	SUS316	1.0
5.341E+01	1.298	+0.4010	94.2	6.0	5.0	k6005d30	SUS316	1.0
5.345E+01	1.084	+0.3408	98.2	6.0	5.0	k6005d31	SUS316	1.0
7.059E+01	3.830	+0.3182	12.9	6.0	5.0	k6005e01	SUS316	1.0
7.000E+01	3.760	+0.3276	20.6	6.0	5.0	k6005e02	SUS316	1.0
7.295E+01	4.496	+0.4061	25.0	6.0	5.0	k6005e03	SUS316	1.0
7.060E+01	4.408	+0.4215	29.5	6.0	5.0	k6005e04	SUS316	1.0
6.707E+01	4.283	+0.4432	34.3	6.0	5.0	k6005e05	SUS316	1.0
6.942E+01	4.161	+0.4224	41.8	6.0	5.0	k6005e06	SUS316	1.0
7.119E+01	4.307	+0.4351	45.9	6.0	5.0	k6005e07	SUS316	1.0
7.236E+01	4.228	+0.4219	48.7	6.0	5.0	k6005e08	SUS316	1.0
7.138E+01	4.004	+0.4044	50.4	6.0	5.0	k6005e09	SUS316	1.0
6.951E+01	3.942	+0.4179	54.7	6.0	5.0	k6005e10	SUS316	1.0
7.079E+01	4.312	+0.4692	62.2	6.0	5.0	k6005e11	SUS316	1.0
7.777E+01	4.350	+0.4317	65.7	6.0	5.0	k6005e12	SUS316	1.0
7.223E+01	4.278	+0.4727	72.1	6.0	5.0	k6005e13	SUS316	1.0
6.325E+01	4.270	+0.5531	75.8	6.0	5.0	k6005e14	SUS316	1.0
6.215E+01	3.869	+0.5140	79.8	6.0	5.0	k6005e15	SUS316	1.0
6.076E+01	4.295	+0.5976	84.6	6.0	5.0	k6005e16	SUS316	1.0
6.734E+01	4.167	+0.5295	89.9	6.0	5.0	k6005e17	SUS316	1.0
7.086E+01	3.649	+0.4470	95.0	6.0	5.0	k6005e18	SUS316	1.0
6.223E+01	1.603	+0.2238	97.6	6.0	5.0	k6005e19	SUS316	1.0
6.689E+01	2.699	+0.3516	96.8	6.0	5.0	k6005e20	SUS316	1.0
6.980E+01	4.367	+0.5226	83.0	6.0	5.0	k6005e21	SUS316	1.0
6.920E+01	3.224	+0.3916	88.6	6.0	5.0	k6005e22	SUS316	1.0
7.098E+01	4.086	+0.4841	86.1	6.0	5.0	k6005e23	SUS316	1.0
6.820E+01	3.764	+0.4758	92.9	6.0	5.0	k6005e24	SUS316	1.0
7.002E+01	3.266	+0.4063	96.2	6.0	5.0	k6005e25	SUS316	1.0
1.011E+02	3.838	+0.1798	16.2	6.0	5.0	k6005f01	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
9.937E+01	4.147	+0.2189	19.2	6.0	5.0	k6005f02	SUS316	1.0
9.703E+01	4.191	+0.2479	27.8	6.0	5.0	k6005f03	SUS316	1.0
1.023E+02	4.197	+0.2324	29.8	6.0	5.0	k6005f04	SUS316	1.0
1.006E+02	4.307	+0.2578	34.8	6.0	5.0	k6005f05	SUS316	1.0
1.017E+02	4.576	+0.2878	40.7	6.0	5.0	k6005f06	SUS316	1.0
9.997E+01	4.100	+0.2613	45.3	6.0	5.0	k6005f07	SUS316	1.0
9.233E+01	4.397	+0.3277	49.5	6.0	5.0	k6005f08	SUS316	1.0
1.023E+02	4.711	+0.3224	54.2	6.0	5.0	k6005f09	SUS316	1.0
1.064E+02	4.699	+0.3133	58.3	6.0	5.0	k6005f10	SUS316	1.0
1.014E+02	4.268	+0.2964	59.0	6.0	5.0	k6005f11	SUS316	1.0
1.010E+02	4.392	+0.3239	67.2	6.0	5.0	k6005f12	SUS316	1.0
1.019E+02	4.444	+0.3293	69.3	6.0	5.0	k6005f13	SUS316	1.0
1.010E+02	4.582	+0.3586	76.8	6.0	5.0	k6005f14	SUS316	1.0
1.027E+02	4.358	+0.3361	78.5	6.0	5.0	k6005f15	SUS316	1.0
1.003E+02	4.438	+0.3623	84.0	6.0	5.0	k6005f16	SUS316	1.0
1.030E+02	4.488	+0.3693	91.0	6.0	5.0	k6005f17	SUS316	1.0
1.018E+02	4.265	+0.3618	95.0	6.0	5.0	k6005f18	SUS316	1.0
1.012E+02	4.145	+0.3590	97.9	6.0	5.0	k6005f19	SUS316	1.0
1.519E+02	4.221	+0.0821	12.1	6.0	5.0	k6005g01	SUS316	1.0
1.512E+02	4.011	+0.0785	16.2	6.0	5.0	k6005g02	SUS316	1.0
1.506E+02	4.028	+0.0895	21.0	6.0	5.0	k6005g03	SUS316	1.0
1.535E+02	3.943	+0.0907	26.7	6.0	5.0	k6005g04	SUS316	1.0
1.488E+02	4.030	+0.1091	29.9	6.0	5.0	k6005g05	SUS316	1.0
1.499E+02	4.094	+0.1203	34.9	6.0	5.0	k6005g06	SUS316	1.0
1.499E+02	4.340	+0.1452	40.4	6.0	5.0	k6005g07	SUS316	1.0
1.507E+02	4.433	+0.1594	45.8	6.0	5.0	k6005g08	SUS316	1.0
1.494E+02	4.805	+0.1923	50.4	6.0	5.0	k6005g09	SUS316	1.0
1.511E+02	4.942	+0.2067	55.5	6.0	5.0	k6005g10	SUS316	1.0
1.511E+02	4.984	+0.2202	61.4	6.0	5.0	k6005g11	SUS316	1.0
1.511E+02	4.946	+0.2256	65.5	6.0	5.0	k6005g12	SUS316	1.0
1.517E+02	4.957	+0.2349	70.7	6.0	5.0	k6005g13	SUS316	1.0
1.516E+02	5.068	+0.2500	75.3	6.0	5.0	k6005g14	SUS316	1.0
1.504E+02	4.735	+0.2372	77.6	6.0	5.0	k6005g15	SUS316	1.0
1.502E+02	5.050	+0.2712	85.7	6.0	5.0	k6005g16	SUS316	1.0
1.485E+02	4.664	+0.2590	89.6	6.0	5.0	k6005g17	SUS316	1.0
1.496E+02	5.226	+0.2939	91.6	6.0	5.0	k6005g18	SUS316	1.0
1.502E+02	5.152	+0.2943	94.8	6.0	5.0	k6005g19	SUS316	1.0
1.484E+02	4.978	+0.2970	99.9	6.0	5.0	k6005g20	SUS316	1.0
2.016E+02	4.453	+0.0362	14.6	6.0	5.0	k6005h01	SUS316	1.0
1.999E+02	4.423	+0.0476	20.5	6.0	5.0	k6005h02	SUS316	1.0
1.993E+02	4.208	+0.0479	25.5	6.0	5.0	k6005h03	SUS316	1.0
2.017E+02	4.307	+0.0566	29.0	6.0	5.0	k6005h04	SUS316	1.0
1.993E+02	4.261	+0.0698	36.0	6.0	5.0	k6005h05	SUS316	1.0
2.000E+02	4.359	+0.0834	41.2	6.0	5.0	k6005h06	SUS316	1.0
2.011E+02	4.721	+0.1142	49.8	6.0	5.0	k6005h08	SUS316	1.0
2.026E+02	5.027	+0.1366	55.4	6.0	5.0	k6005h09	SUS316	1.0
2.008E+02	5.164	+0.1538	60.3	6.0	5.0	k6005h10	SUS316	1.0
2.013E+02	5.243	+0.1662	65.4	6.0	5.0	k6005h11	SUS316	1.0
2.007E+02	5.331	+0.1809	70.8	6.0	5.0	k6005h12	SUS316	1.0
1.989E+02	5.211	+0.1852	74.9	6.0	5.0	k6005h13	SUS316	1.0
2.001E+02	5.372	+0.2021	80.8	6.0	5.0	k6005h14	SUS316	1.0
2.003E+02	5.485	+0.2163	85.9	6.0	5.0	k6005h15	SUS316	1.0
2.013E+02	5.326	+0.2182	91.3	6.0	5.0	k6005h16	SUS316	1.0
2.001E+02	5.625	+0.2413	95.8	6.0	5.0	k6005h17	SUS316	1.0
1.994E+02	5.539	+0.2422	97.9	6.0	5.0	k6005h18	SUS316	1.0
2.017E+02	5.431	+0.2339	97.5	6.0	5.0	k6005h19	SUS316	1.0
3.004E+02	4.659	-0.0204	15.5	6.0	5.0	k6005i01	SUS316	1.0
2.991E+02	4.940	-0.0026	20.3	6.0	5.0	k6005i02	SUS316	1.0
3.003E+02	5.056	+0.0089	24.9	6.0	5.0	k6005i03	SUS316	1.0
3.008E+02	4.869	+0.0138	30.6	6.0	5.0	k6005i04	SUS316	1.0
3.006E+02	4.992	+0.0256	34.9	6.0	5.0	k6005i05	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
3.014E+02	4.708	+0.0168	34.9	6.0	5.0	k6005i06	SUS316	1.0
3.002E+02	4.854	+0.0316	40.2	6.0	5.0	k6005i07	SUS316	1.0
2.995E+02	4.561	+0.0311	44.4	6.0	5.0	k6005i08	SUS316	1.0
2.989E+02	4.831	+0.0504	50.3	6.0	5.0	k6005i09	SUS316	1.0
3.013E+02	5.121	+0.0660	54.7	6.0	5.0	k6005i10	SUS316	1.0
3.017E+02	4.878	+0.0699	60.7	6.0	5.0	k6005i11	SUS316	1.0
2.996E+02	4.642	+0.0710	64.5	6.0	5.0	k6005i12	SUS316	1.0
2.993E+02	4.205	+0.0685	70.0	6.0	5.0	k6005i13	SUS316	1.0
2.999E+02	4.115	+0.0730	74.0	6.0	5.0	k6005i14	SUS316	1.0
2.992E+02	4.017	+0.0814	79.9	6.0	5.0	k6005i15	SUS316	1.0
3.009E+02	4.284	+0.0983	85.1	6.0	5.0	k6005i16	SUS316	1.0
2.991E+02	4.670	+0.1206	90.5	6.0	5.0	k6005i17	SUS316	1.0
3.001E+02	4.736	+0.1294	94.4	6.0	5.0	k6005i18	SUS316	1.0
2.995E+02	4.801	+0.1389	98.3	6.0	5.0	k6005i19	SUS316	1.0
4.996E+02	6.283	-0.0412	18.3	6.0	5.0	k6005j01	SUS316	1.0
5.002E+02	6.299	-0.0382	19.8	6.0	5.0	k6005j02	SUS316	1.0
5.001E+02	6.213	-0.0399	19.7	6.0	5.0	k6005j03	SUS316	1.0
4.990E+02	6.078	-0.0338	24.1	6.0	5.0	k6005j04	SUS316	1.0
5.002E+02	6.007	-0.0329	25.4	6.0	5.0	k6005j05	SUS316	1.0
4.993E+02	5.826	-0.0259	30.8	6.0	5.0	k6005j06	SUS316	1.0
5.004E+02	6.005	-0.0227	30.9	6.0	5.0	k6005j07	SUS316	1.0
4.995E+02	5.713	-0.0191	35.5	6.0	5.0	k6005j08	SUS316	1.0
4.988E+02	5.572	-0.0105	41.4	6.0	5.0	k6005j09	SUS316	1.0
5.006E+02	5.306	-0.0086	45.1	6.0	5.0	k6005j10	SUS316	1.0
5.009E+02	5.617	+0.0065	50.3	6.0	5.0	k6005j11	SUS316	1.0
4.996E+02	5.932	+0.0227	55.8	6.0	5.0	k6005j12	SUS316	1.0
5.000E+02	6.292	+0.0375	60.4	6.0	5.0	k6005j13	SUS316	1.0
4.999E+02	5.282	+0.0307	66.3	6.0	5.0	k6005j14	SUS316	1.0
4.992E+02	6.378	+0.0493	65.8	6.0	5.0	k6005j15	SUS316	1.0
5.002E+02	5.316	+0.0385	70.2	6.0	5.0	k6005j16	SUS316	1.0
4.986E+02	5.523	+0.0494	73.9	6.0	5.0	k6005j17	SUS316	1.0
5.004E+02	5.427	+0.0591	80.2	6.0	5.0	k6005j18	SUS316	1.0
4.998E+02	5.335	+0.0688	86.2	6.0	5.0	k6005j19	SUS316	1.0
5.008E+02	5.329	+0.0711	87.6	6.0	5.0	k6005j20	SUS316	1.0
4.982E+02	5.923	+0.0969	95.5	6.0	5.0	k6005j21	SUS316	1.0
4.990E+02	6.258	+0.1083	98.5	6.0	5.0	k6005j22	SUS316	1.0
5.999E+02	7.346	-0.0452	17.7	6.0	5.0	k6005k01	SUS316	1.0
5.996E+02	7.180	-0.0422	20.6	6.0	5.0	k6005k02	SUS316	1.0
5.978E+02	7.007	-0.0351	25.6	6.0	5.0	k6005k03	SUS316	1.0
5.991E+02	6.551	-0.0326	30.7	6.0	5.0	k6005k04	SUS316	1.0
5.975E+02	6.545	-0.0230	35.7	6.0	5.0	k6005k05	SUS316	1.0
6.003E+02	6.321	-0.0186	40.1	6.0	5.0	k6005k06	SUS316	1.0
5.986E+02	6.136	-0.0110	45.5	6.0	5.0	k6005k07	SUS316	1.0
6.003E+02	5.614	-0.0097	50.2	6.0	5.0	k6005k08	SUS316	1.0
5.984E+02	6.097	+0.0057	54.7	6.0	5.0	k6005k10	SUS316	1.0
6.005E+02	6.020	+0.0143	60.1	6.0	5.0	k6005k11	SUS316	1.0
5.999E+02	5.559	+0.0173	65.3	6.0	5.0	k6005k12	SUS316	1.0
6.002E+02	5.129	+0.0197	70.0	6.0	5.0	k6005k13	SUS316	1.0
5.995E+02	5.338	+0.0314	74.6	6.0	5.0	k6005k14	SUS316	1.0
5.984E+02	6.017	+0.0525	80.4	6.0	5.0	k6005k15	SUS316	1.0
6.029E+02	6.313	+0.0635	84.3	6.0	5.0	k6005k16	SUS316	1.0
5.997E+02	5.918	+0.0697	90.5	6.0	5.0	k6005k17	SUS316	1.0
6.001E+02	6.018	+0.0696	89.7	6.0	5.0	k6005k18	SUS316	1.0
5.984E+02	6.709	+0.0900	95.0	6.0	5.0	k6005k19	SUS316	1.0
5.988E+02	7.118	+0.1020	98.2	6.0	5.0	k6005k20	SUS316	1.0
8.007E+02	9.381	-0.0477	18.9	6.0	5.0	k6005l01	SUS316	1.0
8.024E+02	9.455	-0.0471	18.9	6.0	5.0	k6005l02	SUS316	1.0
8.003E+02	9.050	-0.0397	25.1	6.0	5.0	k6005l03	SUS316	1.0
8.025E+02	8.503	-0.0365	30.2	6.0	5.0	k6005l04	SUS316	1.0
8.021E+02	8.526	-0.0351	30.8	6.0	5.0	k6005l05	SUS316	1.0
8.014E+02	8.029	-0.0326	35.0	6.0	5.0	k6005l06	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
7.988E+02	7.389	-0.0301	40.0	6.0	5.0	k6005l07	SUS316	1.0
7.977E+02	7.362	-0.0200	45.5	6.0	5.0	k6005l08	SUS316	1.0
7.988E+02	7.551	-0.0096	50.0	6.0	5.0	k6005l09	SUS316	1.0
7.993E+02	7.444	-0.0025	54.5	6.0	5.0	k6005l10	SUS316	1.0
7.998E+02	7.316	+0.0049	59.2	6.0	5.0	k6005l11	SUS316	1.0
7.972E+02	6.711	+0.0102	65.5	6.0	5.0	k6005l13	SUS316	1.0
8.023E+02	6.442	+0.0175	71.3	6.0	5.0	k6005l14	SUS316	1.0
7.963E+02	6.227	+0.0237	75.6	6.0	5.0	k6005l15	SUS316	1.0
7.995E+02	6.195	+0.0319	80.3	6.0	5.0	k6005l16	SUS316	1.0
7.990E+02	6.162	+0.0426	86.2	6.0	5.0	k6005l17	SUS316	1.0
7.970E+02	5.962	+0.0486	90.5	6.0	5.0	k6005l18	SUS316	1.0
7.963E+02	5.971	+0.0584	95.7	6.0	5.0	k6005l19	SUS316	1.0
7.980E+02	6.197	+0.0645	97.7	6.0	5.0	k6005l20	SUS316	1.0
1.004E+03	11.52	-0.0493	19.2	6.0	5.0	k6005m01	SUS316	1.0
1.002E+03	10.73	-0.0534	20.6	6.0	5.0	k6005m02	SUS316	1.0
1.001E+03	10.33	-0.0477	25.5	6.0	5.0	k6005m03	SUS316	1.0
1.001E+03	9.556	-0.0463	29.9	6.0	5.0	k6005m04	SUS316	1.0
1.001E+03	9.250	-0.0392	35.2	6.0	5.0	k6005m05	SUS316	1.0
9.991E+02	8.644	-0.0358	39.8	6.0	5.0	k6005m06	SUS316	1.0
1.000E+03	7.031	-0.0414	44.5	6.0	5.0	k6005m07	SUS316	1.0
1.001E+03	7.854	-0.0241	49.9	6.0	5.0	k6005m08	SUS316	1.0
1.003E+03	6.750	-0.0237	55.4	6.0	5.0	k6005m09	SUS316	1.0
1.000E+03	5.974	-0.0218	60.0	6.0	5.0	k6005m10	SUS316	1.0
9.994E+02	5.672	-0.0162	64.4	6.0	5.0	k6005m11	SUS316	1.0
1.000E+03	5.617	-0.0063	70.0	6.0	5.0	k6005m12	SUS316	1.0
9.982E+02	5.667	+0.0036	75.0	6.0	5.0	k6005m13	SUS316	1.0
9.992E+02	5.155	+0.0078	79.7	6.0	5.0	k6005m14	SUS316	1.0
1.000E+03	5.599	+0.0218	85.1	6.0	5.0	k6005m15	SUS316	1.0
9.993E+02	6.104	+0.0343	89.4	6.0	5.0	k6005m16	SUS316	1.0
1.001E+03	6.810	+0.0513	95.2	6.0	5.0	k6005m17	SUS316	1.0
9.950E+02	6.535	+0.0552	98.4	6.0	5.0	k6005m18	SUS316	1.0
1.502E+03	14.70	-0.0621	20.3	6.0	5.0	k6005n02	SUS316	1.0
1.502E+03	14.04	-0.0556	25.9	6.0	5.0	k6005n03	SUS316	1.0
1.508E+03	12.52	-0.0592	28.9	6.0	5.0	k6005n04	SUS316	1.0
1.503E+03	11.91	-0.0518	34.7	6.0	5.0	k6005n05	SUS316	1.0
1.502E+03	11.06	-0.0573	34.4	6.0	5.0	k6005n06	SUS316	1.0
1.503E+03	10.27	-0.0502	40.7	6.0	5.0	k6005n07	SUS316	1.0
1.500E+03	10.41	-0.0429	44.1	6.0	5.0	k6005n08	SUS316	1.0
1.501E+03	9.899	-0.0370	48.9	6.0	5.0	k6005n09	SUS316	1.0
1.499E+03	9.503	-0.0279	55.0	6.0	5.0	k6005n10	SUS316	1.0
1.504E+03	9.656	-0.0191	59.3	6.0	5.0	k6005n11	SUS316	1.0
1.499E+03	9.646	-0.0110	63.6	6.0	5.0	k6005n12	SUS316	1.0
1.500E+03	8.577	-0.0054	70.0	6.0	5.0	k6005n14	SUS316	1.0
1.498E+03	7.084	-0.0044	75.2	6.0	5.0	k6005n15	SUS316	1.0
1.498E+03	8.097	+0.0111	80.3	6.0	5.0	k6005n16	SUS316	1.0
1.502E+03	7.773	+0.0186	85.4	6.0	5.0	k6005n17	SUS316	1.0
1.501E+03	8.058	+0.0304	90.8	6.0	5.0	k6005n19	SUS316	1.0
1.494E+03	8.692	+0.0422	95.0	6.0	5.0	k6005n20	SUS316	1.0
1.498E+03	9.225	+0.0525	98.9	6.0	5.0	k6005n21	SUS316	1.0
1.798E+03	16.56	-0.0775	14.8	6.0	5.0	k6005o01	SUS316	1.0
1.799E+03	17.39	-0.0752	13.9	6.0	5.0	k6005o02	SUS316	1.0
1.806E+03	16.56	-0.0659	21.2	6.0	5.0	k6005o03	SUS316	1.0
1.794E+03	16.01	-0.0597	25.7	6.0	5.0	k6005o04	SUS316	1.0
1.785E+03	15.02	-0.0510	32.8	6.0	5.0	k6005o05	SUS316	1.0
1.783E+03	14.62	-0.0421	38.6	6.0	5.0	k6005o06	SUS316	1.0
1.783E+03	12.57	-0.0444	42.8	6.0	5.0	k6005o07	SUS316	1.0
1.784E+03	11.01	-0.0485	44.8	6.0	5.0	k6005o08	SUS316	1.0
1.802E+03	11.58	-0.0359	50.3	6.0	5.0	k6005o09	SUS316	1.0
1.802E+03	8.604	-0.0438	53.9	6.0	5.0	k6005o11	SUS316	1.0
1.801E+03	8.068	-0.0352	59.9	6.0	5.0	k6005o12	SUS316	1.0
1.807E+03	7.350	-0.0288	65.3	6.0	5.0	k6005o13	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
1.803E+03	7.092	-0.0214	69.9	6.0	5.0	k6005o14	SUS316	1.0
1.805E+03	6.524	-0.0149	74.9	6.0	5.0	k6005o15	SUS316	1.0
1.803E+03	9.308	+0.0104	81.1	6.0	5.0	k6005o16	SUS316	1.0
1.799E+03	8.209	+0.0117	84.6	6.0	5.0	k6005o17	SUS316	1.0
1.792E+03	10.25	+0.0337	90.9	6.0	5.0	k6005o18	SUS316	1.0
1.798E+03	10.55	+0.0431	95.2	6.0	5.0	k6005o19	SUS316	1.0
1.790E+03	10.76	+0.0505	98.5	6.0	5.0	k6005o20	SUS316	1.0
5.880E+00	181	+1.2074	17.9	6.0	25.0	k6025a01	SUS316	1.0
5.880E+00	.181	+1.3323	84.9	6.0	25.0	k6025a02	SUS316	1.0
5.880E+00	.179	+1.2366	40.7	6.0	25.0	k6025a03	SUS316	1.0
5.880E+00	.180	+1.3578	100.0	6.0	25.0	k6025a04	SUS316	1.0
5.880E+00	.178	+1.2519	51.9	6.0	25.0	k6025a05	SUS316	1.0
5.881E+00	176	+1.2490	59.5	6.0	25.0	k6025a06	SUS316	1.0
4.175E+01	919	+0.8241	19.3	6.0	25.0	k6025b01	SUS316	1.0
4.175E+01	.902	+0.8467	40.7	6.0	25.0	k6025b02	SUS316	1.0
4.174E+01	.903	+0.8686	52.1	6.0	25.0	k6025b03	SUS316	1.0
4.661E+01	.822	+0.7084	60.7	6.0	25.0	k6025b04	SUS316	1.0
5.120E+01	.812	+0.6686	81.9	6.0	25.0	k6025b05	SUS316	1.0
5.216E+01	.735	+0.6098	92.2	6.0	25.0	k6025b06	SUS316	1.0
5.304E+01	.313	+0.2568	97.6	6.0	25.0	k6025b07	SUS316	1.0
9.808E+01	1.557	+0.5522	19.1	6.0	25.0	k6025c01	SUS316	1.0
9.878E+01	1.544	+0.5772	38.2	6.0	25.0	k6025c02	SUS316	1.0
9.828E+01	1.363	+0.4987	38.0	6.0	25.0	k6025c03	SUS316	1.0
9.865E+01	1.465	+0.6250	82.3	6.0	25.0	k6025c04	SUS316	1.0
1.007E+02	1.403	+0.6103	96.2	6.0	25.0	k6025c05	SUS316	1.0
9.956E+01	1.499	+0.5863	56.7	6.0	25.0	k6025c06	SUS316	1.0
4.973E+02	3.553	+0.2046	40.1	6.0	25.0	k6025d01	SUS316	1.0
4.961E+02	4.708	+0.3491	61.8	6.0	25.0	k6025d02	SUS316	1.0
4.961E+02	4.517	+0.3678	80.9	6.0	25.0	k6025d03	SUS316	1.0
4.949E+02	4.152	+0.2750	48.2	6.0	25.0	k6025d04	SUS316	1.0
5.024E+02	3.575	+0.1920	34.0	6.0	25.0	k6025d05	SUS316	1.0
4.966E+02	3.563	+0.1641	17.7	6.0	25.0	k6025d06	SUS316	1.0
9.973E+02	5.012	+0.0757	21.3	6.0	25.0	k6025e01	SUS316	1.0
9.974E+02	5.050	+0.1031	35.1	6.0	25.0	k6025e02	SUS316	1.0
9.984E+02	5.004	+0.1270	49.1	6.0	25.0	k6025e03	SUS316	1.0
2.992E+02	2.803	+0.2605	17.2	6.0	25.0	k6025f01	SUS316	1.0
3.003E+02	2.921	+0.3005	30.2	6.0	25.0	k6025f02	SUS316	1.0
3.027E+02	3.067	+0.3390	41.2	6.0	25.0	k6025f03	SUS316	1.0
2.966E+02	3.702	+0.4816	61.7	6.0	25.0	k6025f04	SUS316	1.0
2.998E+02	3.753	+0.5160	79.3	6.0	25.0	k6025f05	SUS316	1.0
2.994E+02	3.716	+0.5430	96.3	6.0	25.0	k6025f06	SUS316	1.0
1.939E+03	7.246	+0.0412	33.4	6.0	25.0	k6025g01	SUS316	1.0
1.947E+03	7.305	+0.0216	22.6	6.0	25.0	k6025g02	SUS316	1.0
1.984E+02	2.225	+0.3478	20.2	6.0	25.0	k6025h01	SUS316	1.0
1.990E+02	2.362	+0.3954	30.1	6.0	25.0	k6025h02	SUS316	1.0
2.996E+02	2.813	+0.2731	23.5	6.0	25.0	k6025h03	SUS316	1.0
4.945E+02	3.487	+0.1630	20.0	6.0	25.0	k6025h04	SUS316	1.0
9.977E+02	4.805	+0.0572	16.4	6.0	25.0	k6025h05	SUS316	1.0
2.033E+02	2.199	+0.3213	15.4	6.0	25.0	k6025h06	SUS316	1.0
2.000E+02	2.518	+0.4216	27.1	6.0	25.0	k6025h07	SUS316	1.0
1.999E+02	2.697	+0.4759	34.8	6.0	25.0	k6025h08	SUS316	1.0
2.016E+02	2.867	+0.5172	39.6	6.0	25.0	k6025h09	SUS316	1.0
1.966E+02	2.828	+0.5353	45.3	6.0	25.0	k6025h10	SUS316	1.0
2.008E+02	2.885	+0.5419	49.3	6.0	25.0	k6025h11	SUS316	1.0
2.006E+02	2.885	+0.5452	50.8	6.0	25.0	k6025h12	SUS316	1.0
2.024E+02	2.879	+0.5471	55.4	6.0	25.0	k6025h13	SUS316	1.0
2.010E+02	2.861	+0.5572	60.7	6.0	25.0	k6025h14	SUS316	1.0
2.021E+02	2.877	+0.5705	67.8	6.0	25.0	k6025h15	SUS316	1.0
2.004E+02	2.811	+0.5679	71.4	6.0	25.0	k6025h16	SUS316	1.0
2.029E+02	2.867	+0.5803	75.6	6.0	25.0	k6025h17	SUS316	1.0
2.011E+02	2.829	+0.5857	79.9	6.0	25.0	k6025h18	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
2.019E+02	2.701	+0.5635	84.3	6.0	25.0	k6025h19	SUS316	1.0
2.032E+02	2.706	+0.5719	90.3	6.0	25.0	k6025h20	SUS316	1.0
2.028E+02	2.704	+0.5821	95.4	6.0	25.0	k6025h21	SUS316	1.0
2.010E+02	2.674	+0.5872	98.8	6.0	25.0	k6025h22	SUS316	1.0
3.007E+02	3.999	+0.5548	81.6	6.0	25.0	k6025h23	SUS316	1.0
2.994E+02	3.953	+0.5646	89.1	6.0	25.0	k6025h24	SUS316	1.0
3.026E+02	3.854	+0.5608	98.1	6.0	25.0	k6025h25	SUS316	1.0
1.013E+02	1.844	+0.6551	18.9	6.0	25.0	k6025i01	SUS316	1.0
1.018E+02	1.788	+0.6380	25.0	6.0	25.0	k6025i02	SUS316	1.0
1.012E+02	1.812	+0.6646	31.1	6.0	25.0	k6025i03	SUS316	1.0
1.005E+02	1.782	+0.6642	35.1	6.0	25.0	k6025i04	SUS316	1.0
9.992E+01	1.765	+0.6781	44.0	6.0	25.0	k6025i05	SUS316	1.0
1.004E+02	1.755	+0.7017	61.0	6.0	25.0	k6025i06	SUS316	1.0
1.003E+02	1.732	+0.7099	70.2	6.0	25.0	k6025i07	SUS316	1.0
1.005E+02	1.716	+0.7127	76.6	6.0	25.0	k6025i08	SUS316	1.0
1.069E+02	1.489	+0.6028	92.3	6.0	25.0	k6025i09	SUS316	1.0
9.794E+01	1.335	+0.6036	99.7	6.0	25.0	k6025i10	SUS316	1.0
1.466E+02	2.193	+0.6550	95.8	6.0	25.0	k6025i11	SUS316	1.0
1.479E+02	2.179	+0.6345	90.2	6.0	25.0	k6025i12	SUS316	1.0
1.482E+02	2.174	+0.6226	85.3	6.0	25.0	k6025i13	SUS316	1.0
1.497E+02	2.234	+0.6202	78.0	6.0	25.0	k6025i14	SUS316	1.0
1.489E+02	2.273	+0.6226	71.1	6.0	25.0	k6025i15	SUS316	1.0
1.486E+02	2.271	+0.6112	64.7	6.0	25.0	k6025i16	SUS316	1.0
1.489E+02	2.325	+0.6160	59.5	6.0	25.0	k6025i17	SUS316	1.0
1.504E+02	2.318	+0.5972	54.3	6.0	25.0	k6025i18	SUS316	1.0
1.495E+02	2.302	+0.5895	50.2	6.0	25.0	k6025i19	SUS316	1.0
1.490E+02	2.356	+0.5966	44.3	6.0	25.0	k6025i20	SUS316	1.0
1.479E+02	2.322	+0.5847	40.5	6.0	25.0	k6025i21	SUS316	1.0
1.467E+02	2.344	+0.5871	35.4	6.0	25.0	k6025i22	SUS316	1.0
1.485E+02	2.354	+0.5734	31.0	6.0	25.0	k6025i23	SUS316	1.0
1.522E+02	2.595	+0.5965	14.9	6.0	25.0	k6025i24	SUS316	1.0
1.505E+02	2.425	+0.5689	22.3	6.0	25.0	k6025i25	SUS316	1.0
2.986E+02	3.723	+0.4329	36.0	6.0	25.0	k6025i26	SUS316	1.0
2.990E+02	3.794	+0.4554	42.8	6.0	25.0	k6025i27	SUS316	1.0
3.042E+02	3.858	+0.4697	50.7	6.0	25.0	k6025i28	SUS316	1.0
3.085E+02	3.896	+0.4802	57.5	6.0	25.0	k6025i29	SUS316	1.0
3.087E+02	3.927	+0.4972	64.4	6.0	25.0	k6025i30	SUS316	1.0
3.003E+02	3.874	+0.5157	70.0	6.0	25.0	k6025i31	SUS316	1.0
3.034E+02	3.864	+0.5196	76.1	6.0	25.0	k6025i32	SUS316	1.0
4.940E+02	4.765	+0.3603	64.1	6.0	25.0	k6025i33	SUS316	1.0
4.971E+02	5.217	+0.3849	57.1	6.0	25.0	k6025i34	SUS316	1.0
5.002E+02	5.322	+0.3980	60.7	6.0	25.0	k6025i35	SUS316	1.0
0.000E+00	1.005	1<X _{ex}	17.1	6.0	25.0	ki6025a1	SUS316	1.0
1.478E+02	3.047	+0.0163	10.9	6.0	5.0	ks106a02	Nickel	1.0
1.990E+02	3.714	-0.0011	10.9	6.0	5.0	ks106a03	Nickel	1.0
4.022E+02	5.595	-0.0409	12.1	6.0	5.0	ks106a04	Nickel	1.0
4.943E+01	2.104	+0.2137	12.5	6.0	5.0	ks106a11	Nickel	1.0
8.003E+01	2.573	+0.1186	11.0	6.0	5.0	ks106a12	Nickel	1.0
1.000E+02	2.551	+0.0616	12.0	6.0	5.0	ks106a13	Nickel	1.0
6.237E+01	2.281	+0.1581	11.1	6.0	5.0	ks106a14	Nickel	1.0
7.178E+01	2.399	+0.1291	10.6	6.0	5.0	ks106a15	Nickel	1.0
1.159E+02	3.105	+0.0724	11.7	6.0	5.0	ks106a16	Nickel	1.0
4.117E+00	.722	+1.3942	14.8	6.0	5.0	ks106a17	Nickel	1.0
5.886E+00	.810	+1.0583	13.4	6.0	5.0	ks106a18	Nickel	1.0
1.177E+01	1.452	+0.9312	13.2	6.0	5.0	ks106a19	Nickel	1.0
1.766E+01	1.812	+0.7441	11.6	6.0	5.0	ks106a20	Nickel	1.0
2.354E+01	2.009	+0.5892	10.6	6.0	5.0	ks106a21	Nickel	1.0
2.943E+01	2.152	+0.4809	10.5	6.0	5.0	ks106a22	Nickel	1.0
3.532E+01	2.316	+0.4138	10.4	6.0	5.0	ks106a23	Nickel	1.0
4.120E+01	2.353	+0.3406	11.4	6.0	5.0	ks106a24	Nickel	1.0
7.063E+00	.902	+0.9676	12.5	6.0	5.0	ks106a25	Nickel	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
8.241E+00	1.002	+0.9140	12.7	6.0	5.0	ks106a26	Nickel	1.0
9.419E+00	1.182	+0.9475	12.0	6.0	5.0	ks106a27	Nickel	1.0
1.060E+01	1.338	+0.9535	11.7	6.0	5.0	ks106a28	Nickel	1.0
1.413E+01	1.611	+0.8437	10.7	6.0	5.0	ks106a29	Nickel	1.0
4.711E+00	.692	+1.1365	11.7	6.0	5.0	ks106a30	Nickel	1.0
0.000E+00	.586	1<X _{ex}	12.5	6.0	5.0	ks106a31	Nickel	1.0
0.000E+00	.536	1<X _{ex}	12.1	6.0	5.0	ks106a32	Nickel	1.0
0.000E+00	.536	1<X _{ex}	13.2	6.0	5.0	ks106a33	Nickel	1.0
5.889E+00	.377	+0.9717	12.4	6.0	10.0	ks106b02	Nickel	1.0
5.889E+00	.383	+0.9884	12.1	6.0	10.0	ks106b03	Nickel	1.0
1.178E+01	.628	+0.7810	12.2	6.0	10.0	ks106b04	Nickel	1.0
2.355E+01	1.052	+0.6276	12.0	6.0	10.0	ks106b05	Nickel	1.0
2.944E+01	1.162	+0.5332	11.1	6.0	10.0	ks106b06	Nickel	1.0
3.533E+01	1.290	+0.4823	11.6	6.0	10.0	ks106b07	Nickel	1.0
4.121E+01	1.359	+0.4170	10.5	6.0	10.0	ks106b08	Nickel	1.0
5.947E+01	1.527	+0.2890	11.1	6.0	10.0	ks106b09	Nickel	1.0
6.948E+01	1.646	+0.2521	10.2	6.0	10.0	ks106b10	Nickel	1.0
7.714E+01	1.688	+0.2227	11.6	6.0	10.0	ks106b11	Nickel	1.0
9.833E+01	1.845	+0.1665	11.1	6.0	10.0	ks106b12	Nickel	1.0
1.189E+02	1.978	+0.1283	10.9	6.0	10.0	ks106b13	Nickel	1.0
1.478E+02	2.130	+0.0903	11.6	6.0	10.0	ks106b14	Nickel	1.0
2.002E+02	2.496	+0.0573	12.4	6.0	10.0	ks106b15	Nickel	1.0
7.066E+00	.418	+0.8849	12.1	6.0	10.0	ks106b17	Nickel	1.0
8.241E+00	.472	+0.8505	11.6	6.0	10.0	ks106b18	Nickel	1.0
9.422E+00	.529	+0.8309	12.2	6.0	10.0	ks106b19	Nickel	1.0
1.060E+01	.557	+0.7658	11.6	6.0	10.0	ks106b20	Nickel	1.0
1.413E+01	.749	+0.7752	11.9	6.0	10.0	ks106b21	Nickel	1.0
1.767E+01	.881	+0.7175	10.8	6.0	10.0	ks106b22	Nickel	1.0
2.490E+02	2.888	+0.0423	12.6	6.0	10.0	ks106b23	Nickel	1.0
3.025E+02	3.055	+0.0153	12.4	6.0	10.0	ks106b24	Nickel	1.0
3.985E+02	3.460	-0.0077	13.5	6.0	10.0	ks106b25	Nickel	1.0
4.711E+00	.359	+1.1848	11.9	6.0	10.0	ks106b26	Nickel	1.0
1.296E+01	.700	+0.7933	12.4	6.0	10.0	ks106b27	Nickel	1.0
1.531E+01	.808	+0.7679	10.7	6.0	10.0	ks106b28	Nickel	1.0
1.649E+01	.863	+0.7614	11.2	6.0	10.0	ks106b29	Nickel	1.0
1.725E+02	2.453	+0.0856	10.9	6.0	10.0	ks106b30	Nickel	1.0
4.711E+00	.361	+1.1919	11.8	6.0	10.0	ks106b31	Nickel	1.0
2.002E+01	.960	+0.6845	11.6	6.0	10.0	ks106b32	Nickel	1.0
2.709E+01	1.162	+0.5931	10.4	6.0	10.0	ks106b33	Nickel	1.0
9.007E+01	1.738	+0.1781	12.3	6.0	10.0	ks106b34	Nickel	1.0
4.887E+01	1.427	+0.3501	10.4	6.0	10.0	ks106b35	Nickel	1.0
4.985E+02	4.046	-0.0168	14.0	6.0	10.0	ks106b36	Nickel	1.0
5.005E+01	.973	+0.6937	10.4	6.0	25.0	ks106c01	Nickel	1.0
9.891E+01	1.402	+0.4617	11.0	6.0	25.0	ks106c02	Nickel	1.0
1.495E+02	1.686	+0.3331	10.8	6.0	25.0	ks106c03	Nickel	1.0
1.978E+02	2.067	+0.2984	11.9	6.0	25.0	ks106c04	Nickel	1.0
2.467E+02	2.391	+0.2640	11.4	6.0	25.0	ks106c05	Nickel	1.0
2.956E+02	2.601	+0.2242	11.3	6.0	25.0	ks106c06	Nickel	1.0
3.008E+02	2.595	+0.2184	12.3	6.0	25.0	ks106c07	Nickel	1.0
3.945E+02	2.926	+0.1647	12.2	6.0	25.0	ks106c08	Nickel	1.0
5.004E+02	3.168	+0.1181	13.0	6.0	25.0	ks106c09	Nickel	1.0
6.005E+02	3.356	+0.0851	13.0	6.0	25.0	ks106c10	Nickel	1.0
5.771E+01	1.142	+0.7113	11.6	6.0	25.0	ks106c11	Nickel	1.0
6.950E+01	1.265	+0.6374	9.5	6.0	25.0	ks106c12	Nickel	1.0
7.950E+01	1.377	+0.5993	10.1	6.0	25.0	ks106c13	Nickel	1.0
9.009E+01	1.435	+0.5392	10.8	6.0	25.0	ks106c14	Nickel	1.0
1.201E+02	1.605	+0.4244	10.3	6.0	25.0	ks106c15	Nickel	1.0
1.701E+02	1.969	+0.3485	12.1	6.0	25.0	ks106c16	Nickel	1.0
3.480E+02	2.788	+0.1910	12.2	6.0	25.0	ks106c17	Nickel	1.0
4.122E+01	.865	+0.7620	10.4	6.0	25.0	ks106c18	Nickel	1.0
5.889E+00	.173	+1.1326	11.5	6.0	25.0	ks106c19	Nickel	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
9.422E+00	.197	+0.7623	12.0	6.0	25.0	ks106c20	Nickel	1.0
1.178E+01	.243	+0.7472	11.4	6.0	25.0	ks106c21	Nickel	1.0
1.413E+01	.291	+0.7480	12.0	6.0	25.0	ks106c22	Nickel	1.0
1.766E+01	.372	+0.7682	12.0	6.0	25.0	ks106c23	Nickel	1.0
2.355E+01	.525	+0.8223	11.3	6.0	25.0	ks106c24	Nickel	1.0
2.944E+01	.655	+0.8217	12.0	6.0	25.0	ks106c25	Nickel	1.0
3.533E+01	.781	+0.8131	10.9	6.0	25.0	ks106c26	Nickel	1.0
7.065E+00	.180	+0.9684	13.1	6.0	25.0	ks106c27	Nickel	1.0
2.002E+01	.428	+0.7850	12.6	6.0	25.0	ks106c28	Nickel	1.0
0.000E+00	.151	1<X _{ex}	13.3	6.0	25.0	ks106c29	Nickel	1.0
9.421E+00	.161	+0.6004	15.0	6.0	25.0	ks106c30	Nickel	1.0
4.710E+00	.171	+1.4489	15.1	6.0	25.0	ks106c31	Nickel	1.0
8.242E+00	.189	+0.8551	13.8	6.0	25.0	ks106c32	Nickel	1.0
1.060E+01	.216	+0.7440	13.9	6.0	25.0	ks106c33	Nickel	1.0
9.927E+02	4.418	+0.0360	13.7	6.0	25.0	ks106c34	Nickel	1.0
1.962E+03	6.397	-0.0130	15.7	6.0	25.0	ks106c35	Nickel	1.0
7.934E+02	3.803	+0.0532	14.8	6.0	25.0	ks106c36	Nickel	1.0
1.494E+03	5.222	-0.0041	14.9	6.0	25.0	ks106c37	Nickel	1.0
1.234E+03	4.613	+0.0054	14.2	6.0	25.0	ks106c38	Nickel	1.0
6.986E+02	3.729	+0.0766	14.4	6.0	25.0	ks106c39	Nickel	1.0
4.125E+00	.085	+1.6634	9.9	6.0	50.0	ks106d01	Nickel	1.0
4.714E+00	.091	+1.5399	10.4	6.0	50.0	ks106d02	Nickel	1.0
5.891E+00	.090	+1.1831	10.7	6.0	50.0	ks106d03	Nickel	1.0
7.069E+00	.095	+1.0208	12.1	6.0	50.0	ks106d04	Nickel	1.0
8.246E+00	.097	+0.8763	11.6	6.0	50.0	ks106d05	Nickel	1.0
9.423E+00	.101	+0.7826	11.8	6.0	50.0	ks106d06	Nickel	1.0
1.060E+01	.110	+0.7565	12.2	6.0	50.0	ks106d07	Nickel	1.0
1.178E+01	.126	+0.7844	12.7	6.0	50.0	ks106d08	Nickel	1.0
1.296E+01	.142	+0.8059	11.8	6.0	50.0	ks106d09	Nickel	1.0
1.413E+01	.144	+0.7357	11.9	6.0	50.0	ks106d10	Nickel	1.0
1.531E+01	.157	+0.7417	12.2	6.0	50.0	ks106d11	Nickel	1.0
1.766E+01	.198	+0.8297	12.2	6.0	50.0	ks106d12	Nickel	1.0
2.355E+01	.280	+0.8904	12.2	6.0	50.0	ks106d13	Nickel	1.0
2.944E+01	.358	+0.9124	11.3	6.0	50.0	ks106d14	Nickel	1.0
3.532E+01	.426	+0.9046	11.7	6.0	50.0	ks106d15	Nickel	1.0
4.121E+01	.503	+0.9145	10.3	6.0	50.0	ks106d16	Nickel	1.0
2.001E+01	.240	+0.9005	12.2	6.0	50.0	ks106d17	Nickel	1.0
5.592E+01	.652	+0.8684	12.0	6.0	50.0	ks106d18	Nickel	1.0
6.710E+01	.801	+0.8903	10.2	6.0	50.0	ks106d19	Nickel	1.0
7.946E+01	.930	+0.8713	11.4	6.0	50.0	ks106d20	Nickel	1.0
9.712E+01	1.065	+0.8040	10.2	6.0	50.0	ks106d21	Nickel	1.0
1.472E+02	1.433	+0.6982	11.9	6.0	50.0	ks106d22	Nickel	1.0
2.007E+02	1.752	+0.6093	12.2	6.0	50.0	ks106d23	Nickel	1.0
2.466E+02	1.909	+0.5226	12.5	6.0	50.0	ks106d24	Nickel	1.0
2.966E+02	2.286	+0.5204	13.0	6.0	50.0	ks106d25	Nickel	1.0
3.867E+02	2.465	+0.4046	14.2	6.0	50.0	ks106d26	Nickel	1.0
4.791E+02	3.031	+0.3990	13.5	6.0	50.0	ks106d27	Nickel	1.0
5.684E+02	3.304	+0.3556	14.6	6.0	50.0	ks106d28	Nickel	1.0
6.542E+02	3.798	+0.3553	14.8	6.0	50.0	ks106d29	Nickel	1.0
7.831E+02	4.725	+0.3750	14.5	6.0	50.0	ks106d30	Nickel	1.0
9.832E+02	5.662	+0.3499	14.1	6.0	50.0	ks106d31	Nickel	1.0
1.225E+03	6.074	+0.2791	14.2	6.0	50.0	ks106d32	Nickel	1.0
1.488E+03	6.214	+0.2110	14.9	6.0	50.0	ks106d33	Nickel	1.0
1.645E+03	6.407	+0.1847	14.1	6.0	50.0	ks106d34	Nickel	1.0
1.703E+03	6.555	+0.1828	15.3	6.0	50.0	ks106d35	Nickel	1.0
1.158E+02	.434	+0.6213	30.8	6.0	113.3	rs001	SUS316	2.0
1.353E+01	.092	+1.2298	33.1	6.0	113.3	rs002	SUS316	2.0
1.882E+01	.111	+1.0471	30.9	6.0	113.3	rs003	SUS316	2.0
2.763E+01	.145	+0.9249	31.4	6.0	113.3	rs004	SUS316	2.0
3.760E+01	.194	+0.8989	29.0	6.0	113.3	rs005	SUS316	2.0
5.106E+01	.261	+0.8954	31.7	6.0	113.3	rs006	SUS316	2.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
7.384E+01	.273	+0.6124	30.8	6.0	113.3	rs007	SUS316	2.0
1.008E+02	.369	+0.6028	30.3	6.0	113.3	rs008	SUS316	2.0
1.702E+01	.093	+0.9656	28.2	6.0	113.3	rs009	SUS316	2.0
2.172E+01	.122	+0.9906	30.1	6.0	113.3	rs010	SUS316	2.0
0.000E+00	.040	1<X _{ex}	29.0	6.0	113.3	rs011	SUS316	2.0
1.449E+02	.582	+0.6775	31.8	6.0	113.3	rs013	SUS316	2.0
1.878E+02	.702	+0.6195	30.8	6.0	113.3	rs014	SUS316	2.0
2.532E+02	.878	+0.5684	32.5	6.0	113.3	rs015	SUS316	2.0
3.341E+02	1.168	+0.5665	28.5	6.0	113.3	rs016	SUS316	2.0
3.235E+01	.176	+0.9595	31.2	6.0	113.3	rs017	SUS316	2.0
4.703E+01	.243	+0.9039	30.3	6.0	113.3	rs018	SUS316	2.0
5.231E+01	.260	+0.8663	30.8	6.0	113.3	rs019	SUS316	2.0
1.022E+02	.480	+0.8088	29.3	6.0	113.3	rs020	SUS316	2.0
0.000E+00	.061	1<X _{ex}	29.4	6.0	113.3	rs021	SUS316	2.0
0.000E+00	.045	1<X _{ex}	29.6	6.0	113.3	rs022	SUS316	2.0
1.627E+02	.642	+0.6597	30.2	6.0	113.3	rs023	SUS316	2.0
2.993E+02	1.016	+0.5509	30.9	6.0	113.3	rs024	SUS316	2.0
4.546E+02	1.514	+0.5380	30.9	6.0	113.3	rs025	SUS316	2.0
6.273E+02	1.999	+0.5066	29.6	6.0	113.3	rs026	SUS316	2.0
5.499E+02	1.742	+0.5035	29.9	6.0	113.3	rs027	SUS316	2.0
4.110E+02	1.355	+0.5345	32.7	6.0	113.3	rs028	SUS316	2.0
1.407E+02	.591	+0.7065	27.8	6.0	113.3	rs029	SUS316	2.0
2.246E+02	.827	+0.6055	29.5	6.0	113.3	rs030	SUS316	2.0
6.962E+02	2.117	+0.4762	29.0	6.0	113.3	rs032	SUS316	2.0
8.497E+02	2.415	+0.4416	31.7	6.0	113.3	rs033	SUS316	2.0
1.135E+03	2.504	+0.3155	32.3	6.0	113.3	rs035	SUS316	2.0
1.256E+03	2.519	+0.2722	30.7	6.0	113.3	rs036	SUS316	2.0
1.544E+03	2.522	+0.1963	29.9	6.0	113.3	rs037	SUS316	2.0
6.356E+01	.306	+0.8333	30.6	6.0	113.3	rs038	SUS316	2.0
7.419E+01	.357	+0.8302	28.5	6.0	113.3	rs039	SUS316	2.0
8.245E+01	.390	+0.8138	28.7	6.0	113.3	rs040	SUS316	2.0
9.305E+01	.438	+0.8063	27.5	6.0	113.3	rs041	SUS316	2.0
1.066E+02	.483	+0.7735	28.5	6.0	113.3	rs042	SUS316	2.0
1.184E+02	.528	+0.7616	29.9	6.0	113.3	rs043	SUS316	2.0
3.503E+02	1.410	+0.6736	29.1	6.0	113.3	rs102	SUS316	2.0
3.369E+02	1.404	+0.7008	28.3	6.0	113.3	rs103	SUS316	2.0
5.242E+01	.280	+0.9397	29.9	6.0	113.3	rs104	SUS316	2.0
1.461E+02	.884	+1.0827	30.5	6.0	113.3	rs105	SUS316	2.0
4.594E+02	1.757	+0.6352	30.0	6.0	113.3	rs106	SUS316	2.0
6.512E+02	2.052	+0.5008	30.2	6.0	113.3	rs107	SUS316	2.0
2.135E+02	1.026	+0.8334	30.8	6.0	113.3	rs108	SUS316	2.0
1.306E+02	.700	+0.9405	28.7	6.0	113.3	rs109	SUS316	2.0
1.203E+02	.621	+0.9059	31.8	6.0	113.3	rs110	SUS316	2.0
1.626E+02	.910	+0.9886	28.8	6.0	113.3	rs111	SUS316	2.0
2.810E+02	1.222	+0.7396	29.5	6.0	113.3	rs112	SUS316	2.0
8.870E+02	2.059	+0.3350	30.4	6.0	113.3	rs113	SUS316	2.0
0.000E+00	.035	1<X _{ex}	28.4	6.0	113.3	rs114	SUS316	2.0
1.590E+01	.104	+1.1841	35.7	6.0	113.3	rs115	SUS316	2.0
8.186E+01	.429	+0.9176	29.7	6.0	113.3	rs116	SUS316	2.0
4.911E+00	.673	+1.0451	9.4	6.0	5.0	m6005s01	SUS316	1.0
1.073E+01	1.125	+0.7609	10.1	6.0	5.0	m6005s03	SUS316	1.0
1.305E+01	1.223	+0.6625	9.9	6.0	5.0	m6005s04	SUS316	1.0
1.656E+01	1.352	+0.5544	9.3	6.0	5.0	m6005s05	SUS316	1.0
2.240E+01	1.460	+0.4091	9.8	6.0	5.0	m6005s06	SUS316	1.0
2.832E+01	1.552	+0.3177	10.2	6.0	5.0	m6005s07	SUS316	1.0
3.421E+01	1.657	+0.2617	10.3	6.0	5.0	m6005s08	SUS316	1.0
4.012E+01	1.742	+0.2182	10.8	6.0	5.0	m6005s09	SUS316	1.0
2.615E+01	1.534	+0.3542	11.2	6.0	5.0	m6005m01	SUS316	1.0
5.536E+01	1.859	+0.1330	11.9	6.0	5.0	m6005m02	SUS316	1.0
8.478E+01	2.123	+0.0581	12.3	6.0	5.0	m6005m03	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
1.143E+02	2.380	+0.0216	12.8	6.0	5.0	m6005m04	SUS316	1.0
1.436E+02	2.761	+0.0088	13.5	6.0	5.0	m6005m05	SUS316	1.0
1.701E+02	2.985	-0.0113	10.7	6.0	5.0	m6005m06	SUS316	1.0
2.293E+02	3.661	-0.0231	11.9	6.0	5.0	m6005m07	SUS316	1.0
2.590E+02	3.980	-0.0276	12.3	6.0	5.0	m6005m08	SUS316	1.0
2.934E+02	4.459	-0.0284	12.7	6.0	5.0	m6005l01	SUS316	1.0
4.092E+02	5.663	-0.0389	13.5	6.0	5.0	m6005l02	SUS316	1.0
5.837E+02	7.032	-0.0535	14.2	6.0	5.0	m6005l03	SUS316	1.0
6.998E+02	7.848	-0.0605	14.4	6.0	5.0	m6005l04	SUS316	1.0
8.766E+02	8.703	-0.0702	15.3	6.0	5.0	m6005l05	SUS316	1.0
1.173E+03	9.907	-0.0810	16.6	6.0	5.0	m6005l06	SUS316	1.0
1.466E+03	11.23	-0.0872	17.0	6.0	5.0	m6005l07	SUS316	1.0
1.754E+03	12.39	-0.0951	15.6	6.0	5.0	m6005l08	SUS316	1.0
5.331E+00	.338	+0.9602	12.5	6.0	10.0	m6010s01	SUS316	1.0
1.115E+01	.635	+0.8466	13.0	6.0	10.0	m6010s02	SUS316	1.0
1.699E+01	.863	+0.7374	12.6	6.0	10.0	m6010s03	SUS316	1.0
2.283E+01	.987	+0.6034	13.0	6.0	10.0	m6010s04	SUS316	1.0
2.870E+01	1.104	+0.5184	12.6	6.0	10.0	m6010s05	SUS316	1.0
3.452E+01	1.166	+0.4367	13.4	6.0	10.0	m6010s06	SUS316	1.0
4.036E+01	1.232	+0.3772	12.4	6.0	10.0	m6010s07	SUS316	1.0
2.684E+01	.999	+0.4963	12.5	6.0	10.0	m6010m01	SUS316	1.0
5.598E+01	1.402	+0.2814	13.0	6.0	10.0	m6010m02	SUS316	1.0
1.141E+02	1.724	+0.1051	12.9	6.0	10.0	m6010m03	SUS316	1.0
1.721E+02	2.102	+0.0533	12.7	6.0	10.0	m6010m04	SUS316	1.0
2.306E+02	2.373	+0.0189	12.5	6.0	10.0	m6010m05	SUS316	1.0
2.588E+02	2.533	+0.0100	12.5	6.0	10.0	m6010m06	SUS316	1.0
2.933E+02	2.563	-0.0090	12.3	6.0	10.0	m6010l01	SUS316	1.0
5.815E+02	4.304	-0.0319	12.7	6.0	10.0	m6010l02	SUS316	1.0
8.716E+02	5.604	-0.0480	13.3	6.0	10.0	m6010l03	SUS316	1.0
1.159E+03	6.702	-0.0604	12.8	6.0	10.0	m6010l04	SUS316	1.0
0.000E+00	.099	1<X _{ex}	6.9	6.0	25.0	m6025s01	SUS316	1.0
4.544E+00	.139	+1.1853	6.9	6.0	25.0	m6025s02	SUS316	1.0
1.028E+01	.180	+0.6008	7.2	6.0	25.0	m6025s03	SUS316	1.0
1.596E+01	.310	+0.6871	7.3	6.0	25.0	m6025s04	SUS316	1.0
2.174E+01	.440	+0.7239	7.5	6.0	25.0	m6025s05	SUS316	1.0
2.746E+01	.519	+0.6631	7.0	6.0	25.0	m6025s06	SUS316	1.0
3.317E+01	.595	+0.6233	8.1	6.0	25.0	m6025s07	SUS316	1.0
3.894E+01	.671	+0.5909	7.6	6.0	25.0	m6025s08	SUS316	1.0
2.451E+01	.442	+0.6276	8.3	6.0	25.0	m6025m01	SUS316	1.0
5.425E+01	.908	+0.5707	8.7	6.0	25.0	m6025m02	SUS316	1.0
8.365E+01	1.205	+0.4702	10.1	6.0	25.0	m6025m03	SUS316	1.0
1.134E+02	1.402	+0.3796	9.9	6.0	25.0	m6025m04	SUS316	1.0
1.721E+02	1.931	+0.3307	10.9	6.0	25.0	m6025m05	SUS316	1.0
2.313E+02	1.932	+0.2055	11.9	6.0	25.0	m6025m06	SUS316	1.0
2.602E+02	2.150	+0.2011	11.7	6.0	25.0	m6025m07	SUS316	1.0
1.727E+02	1.607	+0.2480	12.0	6.0	25.0	m6025m08	SUS316	1.0
2.311E+02	2.010	+0.2202	11.6	6.0	25.0	m6025m09	SUS316	1.0
2.945E+02	2.222	+0.1692	11.6	6.0	25.0	m6025l01	SUS316	1.0
5.889E+02	2.867	+0.0536	13.2	6.0	25.0	m6025l02	SUS316	1.0
8.833E+02	3.129	-0.0052	13.2	6.0	25.0	m6025l03	SUS316	1.0
1.178E+03	3.608	-0.0243	14.3	6.0	25.0	m6025l04	SUS316	1.0
1.472E+03	4.051	-0.0395	13.6	6.0	25.0	m6025l05	SUS316	1.0
1.766E+03	4.541	-0.0475	13.6	6.0	25.0	m6025l06	SUS316	1.0
1.178E+03	3.600	-0.0275	12.8	6.0	25.0	m6025l07	SUS316	1.0
1.059E+01	.111	+0.7599	8.5	6.0	50.0	m6050s22	SUS316	1.0
1.647E+01	.184	+0.8195	9.0	6.0	50.0	m6050s23	SUS316	1.0
2.238E+01	.252	+0.8267	9.2	6.0	50.0	m6050s24	SUS316	1.0
2.828E+01	.328	+0.8590	9.7	6.0	50.0	m6050s25	SUS316	1.0
3.419E+01	.403	+0.8761	9.8	6.0	50.0	m6050s26	SUS316	1.0
4.008E+01	.474	+0.8801	10.6	6.0	50.0	m6050s27	SUS316	1.0
2.582E+01	.280	+0.7948	10.6	6.0	50.0	m6050m21	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
5.517E+01	.646	+0.8724	11.3	6.0	50.0	m6050m22	SUS316	1.0
1.134E+02	1.134	+0.7220	12.2	6.0	50.0	m6050m23	SUS316	1.0
1.724E+02	1.489	+0.6023	12.9	6.0	50.0	m6050m24	SUS316	1.0
2.302E+02	1.824	+0.5398	12.9	6.0	50.0	m6050m25	SUS316	1.0
2.595E+02	1.977	+0.5117	12.5	6.0	50.0	m6050m26	SUS316	1.0
8.557E+01	.954	+0.8269	13.6	6.0	50.0	m6050m27	SUS316	1.0
1.432E+02	1.336	+0.6641	13.0	6.0	50.0	m6050m28	SUS316	1.0
2.934E+02	2.124	+0.4786	12.7	6.0	50.0	m6050l21	SUS316	1.0
5.836E+02	2.992	+0.2935	13.9	6.0	50.0	m6050l22	SUS316	1.0
8.753E+02	3.954	+0.2422	15.4	6.0	50.0	m6050l23	SUS316	1.0
1.173E+03	4.581	+0.1899	16.3	6.0	50.0	m6050l24	SUS316	1.0
4.085E+02	2.671	+0.4163	12.7	6.0	50.0	m6050l25	SUS316	1.0
7.000E+02	3.510	+0.2845	14.4	6.0	50.0	m6050l26	SUS316	1.0

Table 2.6 Group B-1 [1 ≤ X_{ex}]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
5.001E+00	.806	+1.2937	28.2	6.0	5.0	k6005a01	SUS316	1.0
5.022E+00	.776	+1.2651	44.0	6.0	5.0	k6005a02	SUS316	1.0
5.032E+00	.761	+1.3180	88.2	6.0	5.0	k6005a03	SUS316	1.0
5.012E+00	.808	+1.3938	80.9	6.0	5.0	k6005a04	SUS316	1.0
4.992E+00	.772	+1.3459	86.8	6.0	5.0	k6005a05	SUS316	1.0
5.016E+01	3.362	+1.0038	72.9	6.0	5.0	k6005d20	SUS316	1.0
5.880E+00	.181	+1.2074	17.9	6.0	25.0	k6025a01	SUS316	1.0
5.880E+00	.181	+1.3323	84.9	6.0	25.0	k6025a02	SUS316	1.0
5.880E+00	.179	+1.2366	40.7	6.0	25.0	k6025a03	SUS316	1.0
5.880E+00	.180	+1.3578	100.0	6.0	25.0	k6025a04	SUS316	1.0
5.880E+00	.178	+1.2519	51.9	6.0	25.0	k6025a05	SUS316	1.0
5.881E+00	.176	+1.2490	59.5	6.0	25.0	k6025a06	SUS316	1.0
0.000E+00	1.005	1 < X _{ex}	17.1	6.0	25.0	ki6025a1	SUS316	1.0
4.117E+00	.722	+1.3942	14.8	6.0	5.0	ks106a17	Nickel	1.0
5.886E+00	.810	+1.0583	13.4	6.0	5.0	ks106a18	Nickel	1.0
4.711E+00	.692	+1.1365	11.7	6.0	5.0	ks106a30	Nickel	1.0
0.000E+00	.586	1 < X _{ex}	12.5	6.0	5.0	ks106a31	Nickel	1.0
0.000E+00	.536	1 < X _{ex}	12.1	6.0	5.0	ks106a32	Nickel	1.0
0.000E+00	.536	1 < X _{ex}	13.2	6.0	5.0	ks106a33	Nickel	1.0
4.711E+00	.359	+1.1848	11.9	6.0	10.0	ks106b26	Nickel	1.0
4.711E+00	.361	+1.1919	11.8	6.0	10.0	ks106b31	Nickel	1.0
5.889E+00	.173	+1.1326	11.5	6.0	25.0	ks106c19	Nickel	1.0
0.000E+00	.151	1 < X _{ex}	13.3	6.0	25.0	ks106c29	Nickel	1.0
4.710E+00	.171	+1.4489	15.1	6.0	25.0	ks106c31	Nickel	1.0
4.125E+00	.085	+1.6634	9.9	6.0	50.0	ks106d01	Nickel	1.0
4.714E+00	.091	+1.5399	10.4	6.0	50.0	ks106d02	Nickel	1.0
5.891E+00	.090	+1.1831	10.7	6.0	50.0	ks106d03	Nickel	1.0
7.069E+00	.095	+1.0208	12.1	6.0	50.0	ks106d04	Nickel	1.0
1.353E+01	.092	+1.2298	33.1	6.0	113.3	rs002	SUS316	2.0
1.882E+01	.111	+1.0471	30.9	6.0	113.3	rs003	SUS316	2.0
0.000E+00	.040	1 < X _{ex}	29.0	6.0	113.3	rs011	SUS316	2.0
0.000E+00	.061	1 < X _{ex}	29.4	6.0	113.3	rs021	SUS316	2.0
0.000E+00	.045	1 < X _{ex}	29.6	6.0	113.3	rs022	SUS316	2.0
1.461E+02	.884	+1.0827	30.5	6.0	113.3	rs105	SUS316	2.0
0.000E+00	.035	1 < X _{ex}	28.4	6.0	113.3	rs114	SUS316	2.0
1.590E+01	.104	+1.1841	35.7	6.0	113.3	rs115	SUS316	2.0
0.000E+00	6.477	1 < X _{ex}	11.7	1.0	5.0	m1005s09	SUS316	0.5
0.000E+00	.113	1 < X _{ex}	11.3	4.0	25.0	m4025s01	SUS316	1.0
0.000E+00	.066	1 < X _{ex}	8.1	4.0	50.0	m4050s01	SUS316	1.0
0.000E+00	.060	1 < X _{ex}	7.8	4.0	50.0	m4050s09	SUS316	1.0
4.911E+00	.673	+1.0451	9.4	6.0	5.0	m6005s01	SUS316	1.0
0.000E+00	.099	1 < X _{ex}	6.9	6.0	25.0	m6025s01	SUS316	1.0
4.544E+00	.139	+1.1853	6.9	6.0	25.0	m6025s02	SUS316	1.0

Table 2.7 Group B-2 [$0 \leq X_{ex} < 1$]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
3.077E+01	2.659	+0.6100	16.6	6.0	5.0	k6005b01	SUS316	1.0
3.070E+01	2.646	+0.6149	20.3	6.0	5.0	k6005b02	SUS316	1.0
3.057E+01	2.657	+0.6288	24.3	6.0	5.0	k6005b03	SUS316	1.0
3.052E+01	2.248	+0.5334	36.1	6.0	5.0	k6005b04	SUS316	1.0
3.054E+01	2.578	+0.6239	33.5	6.0	5.0	k6005b05	SUS316	1.0
3.047E+01	2.651	+0.6553	38.1	6.0	5.0	k6005b06	SUS316	1.0
3.052E+01	2.632	+0.6603	44.3	6.0	5.0	k6005b07	SUS316	1.0
3.048E+01	2.623	+0.6652	47.9	6.0	5.0	k6005b08	SUS316	1.0
3.040E+01	2.596	+0.6748	56.2	6.0	5.0	k6005b09	SUS316	1.0
3.035E+01	2.584	+0.6769	58.5	6.0	5.0	k6005b10	SUS316	1.0
3.033E+01	2.569	+0.6854	65.2	6.0	5.0	k6005b11	SUS316	1.0
3.638E+01	2.842	+0.6385	71.2	6.0	5.0	k6005b12	SUS316	1.0
4.010E+01	2.420	+0.4940	78.1	6.0	5.0	k6005b13	SUS316	1.0
4.045E+01	1.954	+0.3959	82.8	6.0	5.0	k6005b14	SUS316	1.0
3.864E+01	1.908	+0.3855	72.1	6.0	5.0	k6005b15	SUS316	1.0
3.883E+01	1.669	+0.3335	74.6	6.0	5.0	k6005b16	SUS316	1.0
3.881E+01	1.592	+0.3271	80.5	6.0	5.0	k6005b17	SUS316	1.0
3.645E+01	1.932	+0.4090	67.4	6.0	5.0	k6005b18	SUS316	1.0
3.739E+01	1.624	+0.3434	77.7	6.0	5.0	k6005b19	SUS316	1.0
3.855E+01	1.400	+0.2831	79.2	6.0	5.0	k6005b20	SUS316	1.0
3.797E+01	1.236	+0.2613	85.4	6.0	5.0	k6005b21	SUS316	1.0
3.728E+01	1.140	+0.2557	91.8	6.0	5.0	k6005b22	SUS316	1.0
3.791E+01	1.050	+0.2382	96.2	6.0	5.0	k6005b23	SUS316	1.0
3.789E+01	.971	+0.2251	99.0	6.0	5.0	k6005b24	SUS316	1.0
3.724E+01	1.462	+0.4143	76.2	6.0	5.0	k6005b25	SUS316	1.0
3.993E+01	1.586	+0.4726	83.3	6.0	5.0	k6005b26	SUS316	1.0
3.975E+01	1.491	+0.4496	87.5	6.0	5.0	k6005b27	SUS316	1.0
3.967E+01	1.003	+0.2988	89.7	6.0	5.0	k6005b28	SUS316	1.0
3.944E+01	.922	+0.2836	95.5	6.0	5.0	k6005b29	SUS316	1.0
1.866E+01	2.145	+0.8622	16.2	6.0	5.0	k6005c01	SUS316	1.0
1.866E+01	2.197	+0.8982	22.1	6.0	5.0	k6005c02	SUS316	1.0
1.868E+01	2.221	+0.9137	25.3	6.0	5.0	k6005c03	SUS316	1.0
1.879E+01	2.207	+0.9118	31.1	6.0	5.0	k6005c04	SUS316	1.0
1.881E+01	2.217	+0.9252	36.0	6.0	5.0	k6005c05	SUS316	1.0
1.885E+01	2.147	+0.8998	41.3	6.0	5.0	k6005c06	SUS316	1.0
1.890E+01	2.136	+0.8917	41.3	6.0	5.0	k6005c07	SUS316	1.0
1.918E+01	2.147	+0.8944	47.9	6.0	5.0	k6005c08	SUS316	1.0
1.987E+01	2.206	+0.8918	50.7	6.0	5.0	k6005c09	SUS316	1.0
2.218E+01	2.284	+0.8258	53.6	6.0	5.0	k6005c10	SUS316	1.0
2.230E+01	2.295	+0.8402	61.5	6.0	5.0	k6005c11	SUS316	1.0
2.236E+01	2.273	+0.8384	66.6	6.0	5.0	k6005c12	SUS316	1.0
2.374E+01	2.256	+0.7868	70.2	6.0	5.0	k6005c13	SUS316	1.0
2.436E+01	2.078	+0.7196	80.5	6.0	5.0	k6005c14	SUS316	1.0
2.456E+01	2.038	+0.7094	86.1	6.0	5.0	k6005c15	SUS316	1.0
2.461E+01	1.998	+0.6965	87.8	6.0	5.0	k6005c16	SUS316	1.0
2.464E+01	1.301	+0.4590	95.2	6.0	5.0	k6005c17	SUS316	1.0
2.462E+01	.871	+0.3086	97.4	6.0	5.0	k6005c18	SUS316	1.0
2.465E+01	2.195	+0.7321	69.4	6.0	5.0	k6005c19	SUS316	1.0
2.468E+01	2.122	+0.7148	74.8	6.0	5.0	k6005c20	SUS316	1.0
2.575E+01	.963	+0.2682	83.7	6.0	5.0	k6005c21	SUS316	1.0
2.555E+01	1.115	+0.3217	83.5	6.0	5.0	k6005c22	SUS316	1.0
2.514E+01	1.121	+0.3124	77.9	6.0	5.0	k6005c23	SUS316	1.0
2.503E+01	1.257	+0.3413	70.5	6.0	5.0	k6005c24	SUS316	1.0
2.512E+01	1.103	+0.2925	70.3	6.0	5.0	k6005c25	SUS316	1.0
2.512E+01	.942	+0.2688	88.1	6.0	5.0	k6005c26	SUS316	1.0
2.510E+01	.857	+0.2495	91.8	6.0	5.0	k6005c27	SUS316	1.0
2.514E+01	.846	+0.2581	95.2	6.0	5.0	k6005c28	SUS316	1.0
2.518E+01	.809	+0.2483	96.3	6.0	5.0	k6005c29	SUS316	1.0
2.510E+01	.859	+0.2680	98.5	6.0	5.0	k6005c30	SUS316	1.0
4.252E+01	3.242	+0.5184	15.9	6.0	5.0	k6005d01	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No	Mate- rial	Thickness [mm]
4.252E+01	3.126	+0.5053	21.8	6.0	5.0	k6005d02	SUS316	1.0
4.251E+01	3.231	+0.5384	27.6	6.0	5.0	k6005d03	SUS316	1.0
4.251E+01	3.207	+0.5365	29.3	6.0	5.0	k6005d04	SUS316	1.0
4.247E+01	3.225	+0.5520	35.2	6.0	5.0	k6005d05	SUS316	1.0
4.233E+01	3.078	+0.5335	40.6	6.0	5.0	k6005d06	SUS316	1.0
4.233E+01	3.291	+0.5868	45.3	6.0	5.0	k6005d07	SUS316	1.0
4.434E+01	3.281	+0.5634	50.6	6.0	5.0	k6005d08	SUS316	1.0
4.670E+01	3.333	+0.5558	59.0	6.0	5.0	k6005d09	SUS316	1.0
4.757E+01	3.377	+0.5446	54.8	6.0	5.0	k6005d10	SUS316	1.0
5.097E+01	3.543	+0.5564	68.1	6.0	5.0	k6005d11	SUS316	1.0
5.100E+01	3.376	+0.5329	71.3	6.0	5.0	k6005d12	SUS316	1.0
5.228E+01	3.336	+0.5307	81.4	6.0	5.0	k6005d13	SUS316	1.0
5.281E+01	2.606	+0.3957	77.7	6.0	5.0	k6005d14	SUS316	1.0
5.293E+01	2.410	+0.3808	87.8	6.0	5.0	k6005d15	SUS316	1.0
5.321E+01	1.731	+0.2751	92.9	6.0	5.0	k6005d16	SUS316	1.0
5.447E+01	3.010	+0.4769	93.2	6.0	5.0	k6005d17	SUS316	1.0
4.963E+01	3.315	+0.9678	62.6	6.0	5.0	k6005d18	SUS316	1.0
4.988E+01	3.260	+0.9593	66.8	6.0	5.0	k6005d19	SUS316	1.0
5.034E+01	3.218	+0.9452	76.4	6.0	5.0	k6005d21	SUS316	1.0
5.032E+01	3.112	+0.9369	78.8	6.0	5.0	k6005d22	SUS316	1.0
5.043E+01	2.056	+0.6122	82.3	6.0	5.0	k6005d23	SUS316	1.0
5.043E+01	2.363	+0.7113	83.7	6.0	5.0	k6005d24	SUS316	1.0
5.041E+01	2.289	+0.6925	86.2	6.0	5.0	k6005d25	SUS316	1.0
5.039E+01	2.115	+0.6402	87.5	6.0	5.0	k6005d26	SUS316	1.0
5.158E+01	2.095	+0.6416	90.0	6.0	5.0	k6005d27	SUS316	1.0
5.256E+01	1.712	+0.5265	92.0	6.0	5.0	k6005d28	SUS316	1.0
5.308E+01	1.529	+0.4708	92.6	6.0	5.0	k6005d29	SUS316	1.0
5.341E+01	1.298	+0.4010	94.2	6.0	5.0	k6005d30	SUS316	1.0
5.345E+01	1.084	+0.3408	98.2	6.0	5.0	k6005d31	SUS316	1.0
7.059E+01	3.830	+0.3182	12.9	6.0	5.0	k6005e01	SUS316	1.0
7.000E+01	3.760	+0.3276	20.6	6.0	5.0	k6005e02	SUS316	1.0
7.295E+01	4.496	+0.4061	25.0	6.0	5.0	k6005e03	SUS316	1.0
7.060E+01	4.408	+0.4215	29.5	6.0	5.0	k6005e04	SUS316	1.0
6.707E+01	4.283	+0.4432	34.3	6.0	5.0	k6005e05	SUS316	1.0
6.942E+01	4.161	+0.4224	41.8	6.0	5.0	k6005e06	SUS316	1.0
7.119E+01	4.307	+0.4351	45.9	6.0	5.0	k6005e07	SUS316	1.0
7.236E+01	4.228	+0.4219	48.7	6.0	5.0	k6005e08	SUS316	1.0
7.138E+01	4.004	+0.4044	50.4	6.0	5.0	k6005e09	SUS316	1.0
6.951E+01	3.942	+0.4179	54.7	6.0	5.0	k6005e10	SUS316	1.0
7.079E+01	4.312	+0.4692	62.2	6.0	5.0	k6005e11	SUS316	1.0
7.777E+01	4.350	+0.4317	65.7	6.0	5.0	k6005e12	SUS316	1.0
7.223E+01	4.278	+0.4727	72.1	6.0	5.0	k6005e13	SUS316	1.0
6.325E+01	4.270	+0.5531	75.8	6.0	5.0	k6005e14	SUS316	1.0
6.215E+01	3.869	+0.5140	79.8	6.0	5.0	k6005e15	SUS316	1.0
6.076E+01	4.295	+0.5976	84.6	6.0	5.0	k6005e16	SUS316	1.0
6.734E+01	4.167	+0.5295	89.9	6.0	5.0	k6005e17	SUS316	1.0
7.086E+01	3.649	+0.4470	95.0	6.0	5.0	k6005e18	SUS316	1.0
6.223E+01	1.603	+0.2238	97.6	6.0	5.0	k6005e19	SUS316	1.0
6.689E+01	2.699	+0.3516	96.8	6.0	5.0	k6005e20	SUS316	1.0
6.980E+01	4.367	+0.5226	83.0	6.0	5.0	k6005e21	SUS316	1.0
6.920E+01	3.224	+0.3916	88.6	6.0	5.0	k6005e22	SUS316	1.0
7.098E+01	4.086	+0.4841	86.1	6.0	5.0	k6005e23	SUS316	1.0
6.820E+01	3.764	+0.4758	92.9	6.0	5.0	k6005e24	SUS316	1.0
7.002E+01	3.266	+0.4063	96.2	6.0	5.0	k6005e25	SUS316	1.0
1.011E+02	3.838	+0.1798	16.2	6.0	5.0	k6005f01	SUS316	1.0
9.937E+01	4.147	+0.2189	19.2	6.0	5.0	k6005f02	SUS316	1.0
9.703E+01	4.191	+0.2479	27.8	6.0	5.0	k6005f03	SUS316	1.0
1.023E+02	4.197	+0.2324	29.8	6.0	5.0	k6005f04	SUS316	1.0
1.006E+02	4.307	+0.2578	34.8	6.0	5.0	k6005f05	SUS316	1.0
1.017E+02	4.576	+0.2878	40.7	6.0	5.0	k6005f06	SUS316	1.0
9.997E+01	4.100	+0.2613	45.3	6.0	5.0	k6005f07	SUS316	1.0
9.233E+01	4.397	+0.3277	49.5	6.0	5.0	k6005f08	SUS316	1.0
1.023E+02	4.711	+0.3224	54.2	6.0	5.0	k6005f09	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.064E+02	4.699	+0.3133	58.3	6.0	5.0	k6005f10	SUS316	1.0
1.014E+02	4.268	+0.2964	59.0	6.0	5.0	k6005f11	SUS316	1.0
1.010E+02	4.392	+0.3239	67.2	6.0	5.0	k6005f12	SUS316	1.0
1.019E+02	4.444	+0.3293	69.3	6.0	5.0	k6005f13	SUS316	1.0
1.010E+02	4.582	+0.3586	76.8	6.0	5.0	k6005f14	SUS316	1.0
1.027E+02	4.358	+0.3361	78.5	6.0	5.0	k6005f15	SUS316	1.0
1.003E+02	4.438	+0.3623	84.0	6.0	5.0	k6005f16	SUS316	1.0
1.030E+02	4.488	+0.3693	91.0	6.0	5.0	k6005f17	SUS316	1.0
1.018E+02	4.265	+0.3618	95.0	6.0	5.0	k6005f18	SUS316	1.0
1.012E+02	4.145	+0.3590	97.9	6.0	5.0	k6005f19	SUS316	1.0
1.519E+02	4.221	+0.0821	12.1	6.0	5.0	k6005g01	SUS316	1.0
1.512E+02	4.011	+0.0785	16.2	6.0	5.0	k6005g02	SUS316	1.0
1.506E+02	4.028	+0.0895	21.0	6.0	5.0	k6005g03	SUS316	1.0
1.535E+02	3.943	+0.0907	26.7	6.0	5.0	k6005g04	SUS316	1.0
1.488E+02	4.030	+0.1091	29.9	6.0	5.0	k6005g05	SUS316	1.0
1.499E+02	4.094	+0.1203	34.9	6.0	5.0	k6005g06	SUS316	1.0
1.499E+02	4.340	+0.1452	40.4	6.0	5.0	k6005g07	SUS316	1.0
1.507E+02	4.433	+0.1594	45.8	6.0	5.0	k6005g08	SUS316	1.0
1.494E+02	4.805	+0.1923	50.4	6.0	5.0	k6005g09	SUS316	1.0
1.511E+02	4.942	+0.2067	55.5	6.0	5.0	k6005g10	SUS316	1.0
1.511E+02	4.984	+0.2202	61.4	6.0	5.0	k6005g11	SUS316	1.0
1.511E+02	4.946	+0.2256	65.5	6.0	5.0	k6005g12	SUS316	1.0
1.517E+02	4.957	+0.2349	70.7	6.0	5.0	k6005g13	SUS316	1.0
1.516E+02	5.068	+0.2500	75.3	6.0	5.0	k6005g14	SUS316	1.0
1.504E+02	4.735	+0.2372	77.6	6.0	5.0	k6005g15	SUS316	1.0
1.502E+02	5.050	+0.2712	85.7	6.0	5.0	k6005g16	SUS316	1.0
1.485E+02	4.664	+0.2590	89.6	6.0	5.0	k6005g17	SUS316	1.0
1.496E+02	5.226	+0.2939	91.6	6.0	5.0	k6005g18	SUS316	1.0
1.502E+02	5.152	+0.2943	94.8	6.0	5.0	k6005g19	SUS316	1.0
1.484E+02	4.978	+0.2970	99.9	6.0	5.0	k6005g20	SUS316	1.0
2.016E+02	4.453	+0.0362	14.6	6.0	5.0	k6005h01	SUS316	1.0
1.999E+02	4.423	+0.0476	20.5	6.0	5.0	k6005h02	SUS316	1.0
1.993E+02	4.208	+0.0479	25.5	6.0	5.0	k6005h03	SUS316	1.0
2.017E+02	4.307	+0.0566	29.0	6.0	5.0	k6005h04	SUS316	1.0
1.993E+02	4.261	+0.0698	36.0	6.0	5.0	k6005h05	SUS316	1.0
2.000E+02	4.359	+0.0834	41.2	6.0	5.0	k6005h06	SUS316	1.0
2.011E+02	4.721	+0.1142	49.8	6.0	5.0	k6005h08	SUS316	1.0
2.026E+02	5.027	+0.1366	55.4	6.0	5.0	k6005h09	SUS316	1.0
2.008E+02	5.164	+0.1538	60.3	6.0	5.0	k6005h10	SUS316	1.0
2.013E+02	5.243	+0.1662	65.4	6.0	5.0	k6005h11	SUS316	1.0
2.007E+02	5.331	+0.1809	70.8	6.0	5.0	k6005h12	SUS316	1.0
1.989E+02	5.211	+0.1852	74.9	6.0	5.0	k6005h13	SUS316	1.0
2.001E+02	5.372	+0.2021	80.8	6.0	5.0	k6005h14	SUS316	1.0
2.003E+02	5.485	+0.2163	85.9	6.0	5.0	k6005h15	SUS316	1.0
2.013E+02	5.326	+0.2182	91.3	6.0	5.0	k6005h16	SUS316	1.0
2.001E+02	5.625	+0.2413	95.8	6.0	5.0	k6005h17	SUS316	1.0
1.994E+02	5.539	+0.2422	97.9	6.0	5.0	k6005h18	SUS316	1.0
2.017E+02	5.431	+0.2339	97.5	6.0	5.0	k6005h19	SUS316	1.0
3.003E+02	5.056	+0.0089	24.9	6.0	5.0	k6005i03	SUS316	1.0
3.008E+02	4.869	+0.0138	30.6	6.0	5.0	k6005i04	SUS316	1.0
3.006E+02	4.992	+0.0256	34.9	6.0	5.0	k6005i05	SUS316	1.0
3.014E+02	4.708	+0.0168	34.9	6.0	5.0	k6005i06	SUS316	1.0
3.002E+02	4.854	+0.0316	40.2	6.0	5.0	k6005i07	SUS316	1.0
2.995E+02	4.561	+0.0311	44.4	6.0	5.0	k6005i08	SUS316	1.0
2.989E+02	4.831	+0.0504	50.3	6.0	5.0	k6005i09	SUS316	1.0
3.013E+02	5.121	+0.0660	54.7	6.0	5.0	k6005i10	SUS316	1.0
3.017E+02	4.878	+0.0699	60.7	6.0	5.0	k6005i11	SUS316	1.0
2.996E+02	4.642	+0.0710	64.5	6.0	5.0	k6005i12	SUS316	1.0
2.993E+02	4.205	+0.0685	70.0	6.0	5.0	k6005i13	SUS316	1.0
2.999E+02	4.115	+0.0730	74.0	6.0	5.0	k6005i14	SUS316	1.0
2.992E+02	4.017	+0.0814	79.9	6.0	5.0	k6005i15	SUS316	1.0
3.009E+02	4.284	+0.0983	85.1	6.0	5.0	k6005i16	SUS316	1.0
2.991E+02	4.670	+0.1206	90.5	6.0	5.0	k6005i17	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
3.001E+02	4.736	+0.1294	94.4	6.0	5.0	k6005i18	SUS316	1.0
2.995E+02	4.801	+0.1389	98.3	6.0	5.0	k6005i19	SUS316	1.0
5.009E+02	5.617	+0.0065	50.3	6.0	5.0	k6005j11	SUS316	1.0
4.996E+02	5.932	+0.0227	55.8	6.0	5.0	k6005j12	SUS316	1.0
5.000E+02	6.292	+0.0375	60.4	6.0	5.0	k6005j13	SUS316	1.0
4.999E+02	5.282	+0.0307	66.3	6.0	5.0	k6005j14	SUS316	1.0
4.992E+02	6.378	+0.0493	65.8	6.0	5.0	k6005j15	SUS316	1.0
5.002E+02	5.316	+0.0385	70.2	6.0	5.0	k6005j16	SUS316	1.0
4.986E+02	5.523	+0.0494	73.9	6.0	5.0	k6005j17	SUS316	1.0
5.004E+02	5.427	+0.0591	80.2	6.0	5.0	k6005j18	SUS316	1.0
4.998E+02	5.335	+0.0688	86.2	6.0	5.0	k6005j19	SUS316	1.0
5.008E+02	5.329	+0.0711	87.6	6.0	5.0	k6005j20	SUS316	1.0
4.982E+02	5.923	+0.0969	95.5	6.0	5.0	k6005j21	SUS316	1.0
4.990E+02	6.258	+0.1083	98.5	6.0	5.0	k6005j22	SUS316	1.0
5.984E+02	6.097	+0.0057	54.7	6.0	5.0	k6005k10	SUS316	1.0
6.005E+02	6.020	+0.0143	60.1	6.0	5.0	k6005k11	SUS316	1.0
5.999E+02	5.559	+0.0173	65.3	6.0	5.0	k6005k12	SUS316	1.0
6.002E+02	5.129	+0.0197	70.0	6.0	5.0	k6005k13	SUS316	1.0
5.995E+02	5.338	+0.0314	74.6	6.0	5.0	k6005k14	SUS316	1.0
5.984E+02	6.017	+0.0525	80.4	6.0	5.0	k6005k15	SUS316	1.0
6.029E+02	6.313	+0.0635	84.3	6.0	5.0	k6005k16	SUS316	1.0
5.997E+02	5.918	+0.0697	90.5	6.0	5.0	k6005k17	SUS316	1.0
6.001E+02	6.018	+0.0696	89.7	6.0	5.0	k6005k18	SUS316	1.0
5.984E+02	6.709	+0.0900	95.0	6.0	5.0	k6005k19	SUS316	1.0
5.988E+02	7.118	+0.1020	98.2	6.0	5.0	k6005k20	SUS316	1.0
7.998E+02	7.316	+0.0049	59.2	6.0	5.0	k6005l11	SUS316	1.0
7.972E+02	6.711	+0.0102	65.5	6.0	5.0	k6005l13	SUS316	1.0
8.023E+02	6.442	+0.0175	71.3	6.0	5.0	k6005l14	SUS316	1.0
7.963E+02	6.227	+0.0237	75.6	6.0	5.0	k6005l15	SUS316	1.0
7.995E+02	6.195	+0.0319	80.3	6.0	5.0	k6005l16	SUS316	1.0
7.990E+02	6.162	+0.0426	86.2	6.0	5.0	k6005l17	SUS316	1.0
7.970E+02	5.962	+0.0486	90.5	6.0	5.0	k6005l18	SUS316	1.0
7.963E+02	5.971	+0.0584	95.7	6.0	5.0	k6005l19	SUS316	1.0
7.980E+02	6.197	+0.0645	97.7	6.0	5.0	k6005l20	SUS316	1.0
9.982E+02	5.667	+0.0036	75.0	6.0	5.0	k6005m13	SUS316	1.0
9.992E+02	5.155	+0.0078	79.7	6.0	5.0	k6005m14	SUS316	1.0
1.000E+03	5.599	+0.0218	85.1	6.0	5.0	k6005m15	SUS316	1.0
9.993E+02	6.104	+0.0343	89.4	6.0	5.0	k6005m16	SUS316	1.0
1.001E+03	6.810	+0.0513	95.2	6.0	5.0	k6005m17	SUS316	1.0
9.950E+02	6.535	+0.0552	98.4	6.0	5.0	k6005m18	SUS316	1.0
1.498E+03	8.097	+0.0111	80.3	6.0	5.0	k6005n16	SUS316	1.0
1.502E+03	7.773	+0.0186	85.4	6.0	5.0	k6005n17	SUS316	1.0
1.501E+03	8.058	+0.0304	90.8	6.0	5.0	k6005n19	SUS316	1.0
1.494E+03	8.692	+0.0422	95.0	6.0	5.0	k6005n20	SUS316	1.0
1.498E+03	9.225	+0.0525	98.9	6.0	5.0	k6005n21	SUS316	1.0
1.803E+03	9.308	+0.0104	81.1	6.0	5.0	k6005o16	SUS316	1.0
1.799E+03	8.209	+0.0117	84.6	6.0	5.0	k6005o17	SUS316	1.0
1.792E+03	10.25	+0.0337	90.9	6.0	5.0	k6005o18	SUS316	1.0
1.798E+03	10.55	+0.0431	95.2	6.0	5.0	k6005o19	SUS316	1.0
1.790E+03	10.76	+0.0505	98.5	6.0	5.0	k6005o20	SUS316	1.0
4.175E+01	.919	+0.8241	19.3	6.0	25.0	k6025b01	SUS316	1.0
4.175E+01	.902	+0.8467	40.7	6.0	25.0	k6025b02	SUS316	1.0
4.174E+01	.903	+0.8686	52.1	6.0	25.0	k6025b03	SUS316	1.0
4.661E+01	.822	+0.7084	60.7	6.0	25.0	k6025b04	SUS316	1.0
5.120E+01	.812	+0.6686	81.9	6.0	25.0	k6025b05	SUS316	1.0
5.216E+01	.735	+0.6098	92.2	6.0	25.0	k6025b06	SUS316	1.0
5.304E+01	.313	+0.2568	97.6	6.0	25.0	k6025b07	SUS316	1.0
9.808E+01	1.557	+0.5522	19.1	6.0	25.0	k6025c01	SUS316	1.0
9.878E+01	1.544	+0.5772	38.2	6.0	25.0	k6025c02	SUS316	1.0
9.828E+01	1.363	+0.4987	38.0	6.0	25.0	k6025c03	SUS316	1.0
9.865E+01	1.465	+0.6250	82.3	6.0	25.0	k6025c04	SUS316	1.0
1.007E+02	1.403	+0.6103	96.2	6.0	25.0	k6025c05	SUS316	1.0
9.956E+01	1.499	+0.5863	56.7	6.0	25.0	k6025c06	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
4.973E+02	3.553	+0.2046	40.1	6.0	25.0	k6025d01	SUS316	1.0
4.961E+02	4.708	+0.3491	61.8	6.0	25.0	k6025d02	SUS316	1.0
4.961E+02	4.517	+0.3678	80.9	6.0	25.0	k6025d03	SUS316	1.0
4.949E+02	4.152	+0.2750	48.2	6.0	25.0	k6025d04	SUS316	1.0
5.024E+02	3.575	+0.1920	34.0	6.0	25.0	k6025d05	SUS316	1.0
4.966E+02	3.563	+0.1641	17.7	6.0	25.0	k6025d06	SUS316	1.0
9.973E+02	5.012	+0.0757	21.3	6.0	25.0	k6025e01	SUS316	1.0
9.974E+02	5.050	+0.1031	35.1	6.0	25.0	k6025e02	SUS316	1.0
9.984E+02	5.004	+0.1270	49.1	6.0	25.0	k6025e03	SUS316	1.0
2.992E+02	2.803	+0.2605	17.2	6.0	25.0	k6025f01	SUS316	1.0
3.003E+02	2.921	+0.3005	30.2	6.0	25.0	k6025f02	SUS316	1.0
3.027E+02	3.067	+0.3390	41.2	6.0	25.0	k6025f03	SUS316	1.0
2.966E+02	3.702	+0.4816	61.7	6.0	25.0	k6025f04	SUS316	1.0
2.998E+02	3.753	+0.5160	79.3	6.0	25.0	k6025f05	SUS316	1.0
2.994E+02	3.716	+0.5430	96.3	6.0	25.0	k6025f06	SUS316	1.0
1.939E+03	7.246	+0.0412	33.4	6.0	25.0	k6025g01	SUS316	1.0
1.947E+03	7.305	+0.0216	22.6	6.0	25.0	k6025g02	SUS316	1.0
1.984E+02	2.225	+0.3478	20.2	6.0	25.0	k6025h01	SUS316	1.0
1.990E+02	2.362	+0.3954	30.1	6.0	25.0	k6025h02	SUS316	1.0
2.996E+02	2.813	+0.2731	23.5	6.0	25.0	k6025h03	SUS316	1.0
4.945E+02	3.487	+0.1630	20.0	6.0	25.0	k6025h04	SUS316	1.0
9.977E+02	4.805	+0.0572	16.4	6.0	25.0	k6025h05	SUS316	1.0
2.033E+02	2.199	+0.3213	15.4	6.0	25.0	k6025h06	SUS316	1.0
2.000E+02	2.518	+0.4216	27.1	6.0	25.0	k6025h07	SUS316	1.0
1.999E+02	2.697	+0.4759	34.8	6.0	25.0	k6025h08	SUS316	1.0
2.016E+02	2.867	+0.5172	39.6	6.0	25.0	k6025h09	SUS316	1.0
1.966E+02	2.828	+0.5353	45.3	6.0	25.0	k6025h10	SUS316	1.0
2.008E+02	2.885	+0.5419	49.3	6.0	25.0	k6025h11	SUS316	1.0
2.006E+02	2.885	+0.5452	50.8	6.0	25.0	k6025h12	SUS316	1.0
2.024E+02	2.879	+0.5471	55.4	6.0	25.0	k6025h13	SUS316	1.0
2.010E+02	2.861	+0.5572	60.7	6.0	25.0	k6025h14	SUS316	1.0
2.021E+02	2.877	+0.5705	67.8	6.0	25.0	k6025h15	SUS316	1.0
2.004E+02	2.811	+0.5679	71.4	6.0	25.0	k6025h16	SUS316	1.0
2.029E+02	2.867	+0.5803	75.6	6.0	25.0	k6025h17	SUS316	1.0
2.011E+02	2.829	+0.5857	79.9	6.0	25.0	k6025h18	SUS316	1.0
2.019E+02	2.701	+0.5635	84.3	6.0	25.0	k6025h19	SUS316	1.0
2.032E+02	2.706	+0.5719	90.3	6.0	25.0	k6025h20	SUS316	1.0
2.028E+02	2.704	+0.5821	95.4	6.0	25.0	k6025h21	SUS316	1.0
2.010E+02	2.674	+0.5872	98.8	6.0	25.0	k6025h22	SUS316	1.0
3.007E+02	3.999	+0.5548	81.6	6.0	25.0	k6025h23	SUS316	1.0
2.994E+02	3.953	+0.5646	89.1	6.0	25.0	k6025h24	SUS316	1.0
3.026E+02	3.854	+0.5608	98.1	6.0	25.0	k6025h25	SUS316	1.0
1.013E+02	1.844	+0.6551	18.9	6.0	25.0	k6025i01	SUS316	1.0
1.018E+02	1.788	+0.6380	25.0	6.0	25.0	k6025i02	SUS316	1.0
1.012E+02	1.812	+0.6646	31.1	6.0	25.0	k6025i03	SUS316	1.0
1.005E+02	1.782	+0.6642	35.1	6.0	25.0	k6025i04	SUS316	1.0
9.992E+01	1.765	+0.6781	44.0	6.0	25.0	k6025i05	SUS316	1.0
1.004E+02	1.755	+0.7017	61.0	6.0	25.0	k6025i06	SUS316	1.0
1.003E+02	1.732	+0.7099	70.2	6.0	25.0	k6025i07	SUS316	1.0
1.005E+02	1.716	+0.7127	76.6	6.0	25.0	k6025i08	SUS316	1.0
1.069E+02	1.489	+0.6028	92.3	6.0	25.0	k6025i09	SUS316	1.0
9.794E+01	1.335	+0.6036	99.7	6.0	25.0	k6025i10	SUS316	1.0
1.466E+02	2.193	+0.6550	95.8	6.0	25.0	k6025i11	SUS316	1.0
1.479E+02	2.179	+0.6345	90.2	6.0	25.0	k6025i12	SUS316	1.0
1.482E+02	2.174	+0.6226	85.3	6.0	25.0	k6025i13	SUS316	1.0
1.497E+02	2.234	+0.6202	78.0	6.0	25.0	k6025i14	SUS316	1.0
1.489E+02	2.273	+0.6226	71.1	6.0	25.0	k6025i15	SUS316	1.0
1.486E+02	2.271	+0.6112	64.7	6.0	25.0	k6025i16	SUS316	1.0
1.489E+02	2.325	+0.6160	59.5	6.0	25.0	k6025i17	SUS316	1.0
1.504E+02	2.318	+0.5972	54.3	6.0	25.0	k6025i18	SUS316	1.0
1.495E+02	2.302	+0.5895	50.2	6.0	25.0	k6025i19	SUS316	1.0
1.490E+02	2.356	+0.5966	44.3	6.0	25.0	k6025i20	SUS316	1.0
1.479E+02	2.322	+0.5847	40.5	6.0	25.0	k6025i21	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.467E+02	2.344	+0.5871	35.4	6.0	25.0	k6025i22	SUS316	1.0
1.485E+02	2.354	+0.5734	31.0	6.0	25.0	k6025i23	SUS316	1.0
1.522E+02	2.595	+0.5965	14.9	6.0	25.0	k6025i24	SUS316	1.0
1.505E+02	2.425	+0.5689	22.3	6.0	25.0	k6025i25	SUS316	1.0
2.986E+02	3.723	+0.4329	36.0	6.0	25.0	k6025i26	SUS316	1.0
2.990E+02	3.794	+0.4554	42.8	6.0	25.0	k6025i27	SUS316	1.0
3.042E+02	3.858	+0.4697	50.7	6.0	25.0	k6025i28	SUS316	1.0
3.085E+02	3.896	+0.4802	57.5	6.0	25.0	k6025i29	SUS316	1.0
3.087E+02	3.927	+0.4972	64.4	6.0	25.0	k6025i30	SUS316	1.0
3.003E+02	3.874	+0.5157	70.0	6.0	25.0	k6025i31	SUS316	1.0
3.034E+02	3.864	+0.5196	76.1	6.0	25.0	k6025i32	SUS316	1.0
4.940E+02	4.765	+0.3603	64.1	6.0	25.0	k6025i33	SUS316	1.0
4.971E+02	5.217	+0.3849	57.1	6.0	25.0	k6025i34	SUS316	1.0
5.002E+02	5.322	+0.3980	60.7	6.0	25.0	k6025i35	SUS316	1.0
2.053E+02	4.324	+0.0250	13.5	2.2	5.0	ks10gl03	Nickel	0.5
4.066E+02	8.103	+0.0180	15.1	2.2	5.0	ks10gl04	Nickel	0.5
5.994E+02	10.94	+0.0005	13.7	2.2	5.0	ks10gl05	Nickel	0.5
1.531E+02	5.341	+0.1459	12.6	2.2	5.0	ks10gl07	Nickel	0.5
3.018E+02	6.553	+0.0278	11.9	2.2	5.0	ks10gl08	Nickel	0.5
4.988E+02	9.307	+0.0040	13.6	2.2	5.0	ks10gl09	Nickel	0.5
9.984E+02	6.981	+0.1436	11.0	2.2	25.0	ks10fh01	Nickel	0.5
1.489E+03	8.997	+0.1037	12.2	2.2	25.0	ks10fh02	Nickel	0.5
1.966E+03	8.658	+0.0332	13.3	2.2	25.0	ks10fh03	Nickel	0.5
2.724E+03	7.910	+0.1030	13.5	2.2	51.4	ks10eh08	Nickel	0.5
8.976E+02	5.539	+0.3957	10.9	2.2	51.4	ks10eh09	Nickel	0.5
2.387E+03	7.138	+0.1083	12.1	2.2	51.4	ks10eh14	Nickel	0.5
1.454E+03	6.255	+0.2261	11.2	2.2	51.4	ks10eh15	Nickel	0.5
1.217E+03	5.645	+0.2553	10.5	2.2	51.4	ks10eh16	Nickel	0.5
1.935E+03	6.372	+0.1353	11.9	2.2	51.4	ks10eh17	Nickel	0.5
2.474E+03	7.301	+0.1037	11.6	2.2	51.4	ks10eh18	Nickel	0.5
3.454E+03	7.010	+0.0224	13.0	2.2	51.4	ks10eh19	Nickel	0.5
3.884E+03	8.051	+0.0257	12.7	2.2	51.4	ks10eh20	Nickel	0.5
1.006E+02	2.940	+0.0962	12.9	4.0	5.0	ks104a01	Nickel	0.25
1.006E+02	3.050	+0.1052	12.5	4.0	5.0	ks104a02	Nickel	0.25
1.986E+02	4.361	+0.0283	11.0	4.0	5.0	ks104a03	Nickel	0.25
5.162E+01	2.176	+0.2107	12.8	4.0	5.0	ks104a04	Nickel	0.25
4.102E+01	2.041	+0.2785	13.0	4.0	5.0	ks104a05	Nickel	0.25
1.006E+02	2.002	+0.1846	10.0	4.0	10.0	ks104b02	Nickel	0.25
2.023E+02	2.483	+0.0494	10.0	4.0	10.0	ks104b03	Nickel	0.25
3.032E+02	1.639	+0.0743	11.6	4.0	25.0	ks104c02	Nickel	0.25
2.634E+02	1.944	+0.4879	11.1	4.0	50.0	ks104d01	Nickel	0.25
4.848E+02	2.409	+0.2757	11.9	4.0	50.0	ks104d02	Nickel	0.25
1.478E+02	3.047	+0.0163	10.9	6.0	5.0	ks106a02	Nickel	1.0
4.943E+01	2.104	+0.2137	12.5	6.0	5.0	ks106a11	Nickel	1.0
8.003E+01	2.573	+0.1186	11.0	6.0	5.0	ks106a12	Nickel	1.0
1.000E+02	2.551	+0.0616	12.0	6.0	5.0	ks106a13	Nickel	1.0
6.237E+01	2.281	+0.1581	11.1	6.0	5.0	ks106a14	Nickel	1.0
7.178E+01	2.399	+0.1291	10.6	6.0	5.0	ks106a15	Nickel	1.0
1.159E+02	3.105	+0.0724	11.7	6.0	5.0	ks106a16	Nickel	1.0
1.177E+01	1.452	+0.9312	13.2	6.0	5.0	ks106a19	Nickel	1.0
1.766E+01	1.812	+0.7441	11.6	6.0	5.0	ks106a20	Nickel	1.0
2.354E+01	2.009	+0.5892	10.6	6.0	5.0	ks106a21	Nickel	1.0
2.943E+01	2.152	+0.4809	10.5	6.0	5.0	ks106a22	Nickel	1.0
3.532E+01	2.316	+0.4138	10.4	6.0	5.0	ks106a23	Nickel	1.0
4.120E+01	2.353	+0.3406	11.4	6.0	5.0	ks106a24	Nickel	1.0
7.063E+00	.902	+0.9676	12.5	6.0	5.0	ks106a25	Nickel	1.0
8.241E+00	1.002	+0.9140	12.7	6.0	5.0	ks106a26	Nickel	1.0
9.419E+00	1.182	+0.9475	12.0	6.0	5.0	ks106a27	Nickel	1.0
1.060E+01	1.338	+0.9535	11.7	6.0	5.0	ks106a28	Nickel	1.0
1.413E+01	1.611	+0.8437	10.7	6.0	5.0	ks106a29	Nickel	1.0
5.889E+00	.377	+0.9717	12.4	6.0	10.0	ks106b02	Nickel	1.0
5.889E+00	.383	+0.9884	12.1	6.0	10.0	ks106b03	Nickel	1.0
1.178E+01	.628	+0.7810	12.2	6.0	10.0	ks106b04	Nickel	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
2.355E+01	1.052	+0.6276	12.0	6.0	10.0	ks106b05	Nickel	1.0
2.944E+01	1.162	+0.5332	11.1	6.0	10.0	ks106b06	Nickel	1.0
3.533E+01	1.290	+0.4823	11.6	6.0	10.0	ks106b07	Nickel	1.0
4.121E+01	1.359	+0.4170	10.5	6.0	10.0	ks106b08	Nickel	1.0
5.947E+01	1.527	+0.2890	11.1	6.0	10.0	ks106b09	Nickel	1.0
6.948E+01	1.646	+0.2521	10.2	6.0	10.0	ks106b10	Nickel	1.0
7.714E+01	1.688	+0.2227	11.6	6.0	10.0	ks106b11	Nickel	1.0
9.833E+01	1.845	+0.1665	11.1	6.0	10.0	ks106b12	Nickel	1.0
1.189E+02	1.978	+0.1283	10.9	6.0	10.0	ks106b13	Nickel	1.0
1.478E+02	2.130	+0.0903	11.6	6.0	10.0	ks106b14	Nickel	1.0
2.002E+02	2.496	+0.0573	12.4	6.0	10.0	ks106b15	Nickel	1.0
7.066E+00	.418	+0.8849	12.1	6.0	10.0	ks106b17	Nickel	1.0
8.244E+00	.472	+0.8505	11.6	6.0	10.0	ks106b18	Nickel	1.0
9.422E+00	.529	+0.8309	12.2	6.0	10.0	ks106b19	Nickel	1.0
1.060E+01	.557	+0.7658	11.6	6.0	10.0	ks106b20	Nickel	1.0
1.413E+01	.749	+0.7752	11.9	6.0	10.0	ks106b21	Nickel	1.0
1.767E+01	.881	+0.7175	10.8	6.0	10.0	ks106b22	Nickel	1.0
2.490E+02	2.888	+0.0423	12.6	6.0	10.0	ks106b23	Nickel	1.0
3.025E+02	3.055	+0.0153	12.4	6.0	10.0	ks106b24	Nickel	1.0
1.296E+01	.700	+0.7933	12.4	6.0	10.0	ks106b27	Nickel	1.0
1.531E+01	.808	+0.7679	10.7	6.0	10.0	ks106b28	Nickel	1.0
1.649E+01	.863	+0.7614	11.2	6.0	10.0	ks106b29	Nickel	1.0
1.725E+02	2.453	+0.0856	10.9	6.0	10.0	ks106b30	Nickel	1.0
2.002E+01	.960	+0.6845	11.6	6.0	10.0	ks106b32	Nickel	1.0
2.709E+01	1.162	+0.5931	10.4	6.0	10.0	ks106b33	Nickel	1.0
9.007E+01	1.738	+0.1781	12.3	6.0	10.0	ks106b34	Nickel	1.0
4.887E+01	1.427	+0.3501	10.4	6.0	10.0	ks106b35	Nickel	1.0
5.005E+01	.973	+0.6937	10.4	6.0	25.0	ks106c01	Nickel	1.0
9.891E+01	1.402	+0.4617	11.0	6.0	25.0	ks106c02	Nickel	1.0
1.495E+02	1.686	+0.3331	10.8	6.0	25.0	ks106c03	Nickel	1.0
1.978E+02	2.067	+0.2984	11.9	6.0	25.0	ks106c04	Nickel	1.0
2.467E+02	2.391	+0.2640	11.4	6.0	25.0	ks106c05	Nickel	1.0
2.956E+02	2.601	+0.2242	11.3	6.0	25.0	ks106c06	Nickel	1.0
3.008E+02	2.595	+0.2184	12.3	6.0	25.0	ks106c07	Nickel	1.0
3.945E+02	2.926	+0.1647	12.2	6.0	25.0	ks106c08	Nickel	1.0
5.004E+02	3.168	+0.1181	13.0	6.0	25.0	ks106c09	Nickel	1.0
6.005E+02	3.356	+0.0851	13.0	6.0	25.0	ks106c10	Nickel	1.0
5.771E+01	1.142	+0.7113	11.6	6.0	25.0	ks106c11	Nickel	1.0
6.950E+01	1.265	+0.6374	9.5	6.0	25.0	ks106c12	Nickel	1.0
7.950E+01	1.377	+0.5993	10.1	6.0	25.0	ks106c13	Nickel	1.0
9.009E+01	1.435	+0.5392	10.8	6.0	25.0	ks106c14	Nickel	1.0
1.201E+02	1.605	+0.4244	10.3	6.0	25.0	ks106c15	Nickel	1.0
1.701E+02	1.969	+0.3485	12.1	6.0	25.0	ks106c16	Nickel	1.0
3.480E+02	2.788	+0.1910	12.2	6.0	25.0	ks106c17	Nickel	1.0
4.122E+01	.865	+0.7620	10.4	6.0	25.0	ks106c18	Nickel	1.0
9.422E+00	.197	+0.7623	12.0	6.0	25.0	ks106c20	Nickel	1.0
1.178E+01	.243	+0.7472	11.4	6.0	25.0	ks106c21	Nickel	1.0
1.413E+01	.291	+0.7480	12.0	6.0	25.0	ks106c22	Nickel	1.0
1.766E+01	.372	+0.7682	12.0	6.0	25.0	ks106c23	Nickel	1.0
2.355E+01	.525	+0.8223	11.3	6.0	25.0	ks106c24	Nickel	1.0
2.944E+01	.655	+0.8217	12.0	6.0	25.0	ks106c25	Nickel	1.0
3.533E+01	.781	+0.8131	10.9	6.0	25.0	ks106c26	Nickel	1.0
7.065E+00	.180	+0.9684	13.1	6.0	25.0	ks106c27	Nickel	1.0
2.002E+01	.428	+0.7850	12.6	6.0	25.0	ks106c28	Nickel	1.0
9.421E+00	.161	+0.6004	15.0	6.0	25.0	ks106c30	Nickel	1.0
8.242E+00	.189	+0.8551	13.8	6.0	25.0	ks106c32	Nickel	1.0
1.060E+01	.216	+0.7440	13.9	6.0	25.0	ks106c33	Nickel	1.0
9.927E+02	4.418	+0.0360	13.7	6.0	25.0	ks106c34	Nickel	1.0
7.934E+02	3.803	+0.0532	14.8	6.0	25.0	ks106c36	Nickel	1.0
1.234E+03	4.613	+0.0054	14.2	6.0	25.0	ks106c38	Nickel	1.0
6.986E+02	3.729	+0.0766	14.4	6.0	25.0	ks106c39	Nickel	1.0
8.246E+00	.097	+0.8763	11.6	6.0	50.0	ks106d05	Nickel	1.0
9.423E+00	.101	+0.7826	11.8	6.0	50.0	ks106d06	Nickel	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.060E+01	.110	+0.7565	12.2	6.0	50.0	ks106d07	Nickel	1.0
1.178E+01	.126	+0.7844	12.7	6.0	50.0	ks106d08	Nickel	1.0
1.296E+01	.142	+0.8059	11.8	6.0	50.0	ks106d09	Nickel	1.0
1.413E+01	.144	+0.7357	11.9	6.0	50.0	ks106d10	Nickel	1.0
1.531E+01	.157	+0.7417	12.2	6.0	50.0	ks106d11	Nickel	1.0
1.766E+01	.198	+0.8297	12.2	6.0	50.0	ks106d12	Nickel	1.0
2.355E+01	.280	+0.8904	12.2	6.0	50.0	ks106d13	Nickel	1.0
2.944E+01	.358	+0.9124	11.3	6.0	50.0	ks106d14	Nickel	1.0
3.532E+01	.426	+0.9046	11.7	6.0	50.0	ks106d15	Nickel	1.0
4.121E+01	.503	+0.9145	10.3	6.0	50.0	ks106d16	Nickel	1.0
2.001E+01	.240	+0.9005	12.2	6.0	50.0	ks106d17	Nickel	1.0
5.592E+01	.652	+0.8684	12.0	6.0	50.0	ks106d18	Nickel	1.0
6.710E+01	.801	+0.8903	10.2	6.0	50.0	ks106d19	Nickel	1.0
7.946E+01	.930	+0.8713	11.4	6.0	50.0	ks106d20	Nickel	1.0
9.712E+01	1.065	+0.8040	10.2	6.0	50.0	ks106d21	Nickel	1.0
1.472E+02	1.433	+0.6982	11.9	6.0	50.0	ks106d22	Nickel	1.0
2.007E+02	1.752	+0.6093	12.2	6.0	50.0	ks106d23	Nickel	1.0
2.466E+02	1.909	+0.5226	12.5	6.0	50.0	ks106d24	Nickel	1.0
2.966E+02	2.286	+0.5204	13.0	6.0	50.0	ks106d25	Nickel	1.0
3.867E+02	2.465	+0.4046	14.2	6.0	50.0	ks106d26	Nickel	1.0
4.791E+02	3.031	+0.3990	13.5	6.0	50.0	ks106d27	Nickel	1.0
5.684E+02	3.304	+0.3556	14.6	6.0	50.0	ks106d28	Nickel	1.0
6.542E+02	3.798	+0.3553	14.8	6.0	50.0	ks106d29	Nickel	1.0
7.831E+02	4.725	+0.3750	14.5	6.0	50.0	ks106d30	Nickel	1.0
9.832E+02	5.662	+0.3499	14.1	6.0	50.0	ks106d31	Nickel	1.0
1.225E+03	6.074	+0.2791	14.2	6.0	50.0	ks106d32	Nickel	1.0
1.488E+03	6.214	+0.2110	14.9	6.0	50.0	ks106d33	Nickel	1.0
1.645E+03	6.407	+0.1847	14.1	6.0	50.0	ks106d34	Nickel	1.0
1.703E+03	6.555	+0.1828	15.3	6.0	50.0	ks106d35	Nickel	1.0
1.158E+02	.434	+0.6213	30.8	6.0	113.3	rs001	SUS316	2.0
2.763E+01	.145	+0.9249	31.4	6.0	113.3	rs004	SUS316	2.0
3.760E+01	.194	+0.8989	29.0	6.0	113.3	rs005	SUS316	2.0
5.106E+01	.261	+0.8954	31.7	6.0	113.3	rs006	SUS316	2.0
7.384E+01	.273	+0.6124	30.8	6.0	113.3	rs007	SUS316	2.0
1.008E+02	.369	+0.6028	30.3	6.0	113.3	rs008	SUS316	2.0
1.702E+01	.093	+0.9656	28.2	6.0	113.3	rs009	SUS316	2.0
2.172E+01	.122	+0.9906	30.1	6.0	113.3	rs010	SUS316	2.0
1.449E+02	.582	+0.6775	31.8	6.0	113.3	rs013	SUS316	2.0
1.878E+02	.702	+0.6195	30.8	6.0	113.3	rs014	SUS316	2.0
2.532E+02	.878	+0.5684	32.5	6.0	113.3	rs015	SUS316	2.0
3.341E+02	1.168	+0.5665	28.5	6.0	113.3	rs016	SUS316	2.0
3.235E+01	.176	+0.9595	31.2	6.0	113.3	rs017	SUS316	2.0
4.703E+01	.243	+0.9039	30.3	6.0	113.3	rs018	SUS316	2.0
5.231E+01	.260	+0.8663	30.8	6.0	113.3	rs019	SUS316	2.0
1.022E+02	.480	+0.8088	29.3	6.0	113.3	rs020	SUS316	2.0
1.627E+02	.642	+0.6597	30.2	6.0	113.3	rs023	SUS316	2.0
2.993E+02	1.016	+0.5509	30.9	6.0	113.3	rs024	SUS316	2.0
4.546E+02	1.514	+0.5380	30.9	6.0	113.3	rs025	SUS316	2.0
6.273E+02	1.999	+0.5066	29.6	6.0	113.3	rs026	SUS316	2.0
5.499E+02	1.742	+0.5035	29.9	6.0	113.3	rs027	SUS316	2.0
4.110E+02	1.355	+0.5345	32.7	6.0	113.3	rs028	SUS316	2.0
1.407E+02	.591	+0.7065	27.8	6.0	113.3	rs029	SUS316	2.0
2.246E+02	.827	+0.6055	29.5	6.0	113.3	rs030	SUS316	2.0
6.962E+02	2.117	+0.4762	29.0	6.0	113.3	rs032	SUS316	2.0
8.497E+02	2.415	+0.4416	31.7	6.0	113.3	rs033	SUS316	2.0
1.135E+03	2.504	+0.3155	32.3	6.0	113.3	rs035	SUS316	2.0
1.256E+03	2.519	+0.2722	30.7	6.0	113.3	rs036	SUS316	2.0
1.544E+03	2.522	+0.1963	29.9	6.0	113.3	rs037	SUS316	2.0
6.356E+01	.306	+0.8333	30.6	6.0	113.3	rs038	SUS316	2.0
7.419E+01	.357	+0.8302	28.5	6.0	113.3	rs039	SUS316	2.0
8.245E+01	.390	+0.8138	28.7	6.0	113.3	rs040	SUS316	2.0
9.305E+01	.438	+0.8063	27.5	6.0	113.3	rs041	SUS316	2.0
1.066E+02	.483	+0.7735	28.5	6.0	113.3	rs042	SUS316	2.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.184E+02	.528	+0.7616	29.9	6.0	113.3	rs043	SUS316	2.0
3.503E+02	1.410	+0.6736	29.1	6.0	113.3	rs102	SUS316	2.0
3.369E+02	1.404	+0.7008	28.3	6.0	113.3	rs103	SUS316	2.0
5.242E+01	.280	+0.9397	29.9	6.0	113.3	rs104	SUS316	2.0
4.594E+02	1.757	+0.6352	30.0	6.0	113.3	rs106	SUS316	2.0
6.512E+02	2.052	+0.5008	30.2	6.0	113.3	rs107	SUS316	2.0
2.135E+02	1.026	+0.8334	30.8	6.0	113.3	rs108	SUS316	2.0
1.306E+02	.700	+0.9405	28.7	6.0	113.3	rs109	SUS316	2.0
1.203E+02	.621	+0.9059	31.8	6.0	113.3	rs110	SUS316	2.0
1.626E+02	.910	+0.9886	28.8	6.0	113.3	rs111	SUS316	2.0
2.810E+02	1.222	+0.7396	29.5	6.0	113.3	rs112	SUS316	2.0
8.870E+02	2.059	+0.3350	30.4	6.0	113.3	rs113	SUS316	2.0
8.186E+01	.429	+0.9176	29.7	6.0	113.3	rs116	SUS316	2.0
1.797E+02	12.31	+0.4387	9.8	1.0	5.0	m1005s01	SUS316	0.5
3.911E+02	19.45	+0.2726	10.1	1.0	5.0	m1005s02	SUS316	0.5
6.012E+02	24.21	+0.1890	10.1	1.0	5.0	m1005s03	SUS316	0.5
8.131E+02	29.38	+0.1528	10.4	1.0	5.0	m1005s04	SUS316	0.5
1.025E+03	31.44	+0.1061	11.2	1.0	5.0	m1005s05	SUS316	0.5
1.234E+03	24.84	+0.0125	11.2	1.0	5.0	m1005s06	SUS316	0.5
1.236E+03	25.15	+0.0139	10.9	1.0	5.0	m1005s08	SUS316	0.5
9.354E+02	22.15	+0.0446	11.5	1.0	5.0	m1005m01	SUS316	0.5
1.701E+02	5.141	+0.4165	7.5	1.0	11.0	m1010s01	SUS316	0.5
3.834E+02	8.244	+0.2469	7.8	1.0	11.0	m1010s02	SUS316	0.5
5.938E+02	9.946	+0.1552	8.3	1.0	11.0	m1010s03	SUS316	0.5
8.042E+02	7.084	+0.0012	8.7	1.0	11.0	m1010s04	SUS316	0.5
1.017E+03	12.56	+0.0704	8.8	1.0	11.0	m1010s05	SUS316	0.5
8.082E+02	7.402	+0.0097	9.6	1.0	11.0	m1010s08	SUS316	0.5
1.671E+02	2.781	+0.5630	6.7	1.0	25.0	m1025s01	SUS316	0.5
3.736E+02	5.430	+0.4719	7.8	1.0	25.0	m1025s02	SUS316	0.5
5.802E+02	7.125	+0.3715	7.6	1.0	25.0	m1025s03	SUS316	0.5
7.866E+02	8.088	+0.2833	7.8	1.0	25.0	m1025s04	SUS316	0.5
9.943E+02	9.002	+0.2301	8.4	1.0	25.0	m1025s05	SUS316	0.5
1.201E+03	9.514	+0.1803	8.6	1.0	25.0	m1025s06	SUS316	0.5
1.409E+03	10.28	+0.1537	9.2	1.0	25.0	m1025s07	SUS316	0.5
9.087E+02	8.360	+0.2371	8.7	1.0	25.0	m1025m01	SUS316	0.5
1.967E+03	11.76	+0.0961	9.6	1.0	25.0	m1025m02	SUS316	0.5
4.105E+03	16.80	+0.0153	11.1	1.0	25.0	m1025m03	SUS316	0.5
3.780E+02	3.205	+0.5809	8.7	1.0	50.0	m1050s02	SUS316	0.5
5.838E+02	4.595	+0.5276	9.0	1.0	50.0	m1050s03	SUS316	0.5
7.894E+02	5.962	+0.4982	8.4	1.0	50.0	m1050s04	SUS316	0.5
9.968E+02	6.788	+0.4329	8.7	1.0	50.0	m1050s05	SUS316	0.5
1.411E+03	6.843	+0.2602	9.2	1.0	50.0	m1050s07	SUS316	0.5
9.087E+02	6.056	+0.4210	9.2	1.0	50.0	m1050m01	SUS316	0.5
1.971E+03	9.534	+0.2601	9.8	1.0	50.0	m1050m02	SUS316	0.5
4.095E+03	11.09	+0.0734	10.8	1.0	50.0	m1050m03	SUS316	0.5
1.293E+02	.719	+0.8132	7.8	1.0	100.0	m1100s01	SUS316	0.5
1.726E+02	.966	+0.8209	8.2	1.0	100.0	m1100s02	SUS316	0.5
2.151E+02	1.200	+0.8179	8.4	1.0	100.0	m1100s03	SUS316	0.5
2.576E+02	1.452	+0.8275	8.1	1.0	100.0	m1100s04	SUS316	0.5
2.993E+02	1.734	+0.8556	8.4	1.0	100.0	m1100s05	SUS316	0.5
3.834E+02	2.045	+0.7740	8.2	1.0	100.0	m1100s06	SUS316	0.5
4.672E+02	2.314	+0.7062	8.0	1.0	100.0	m1100s07	SUS316	0.5
5.930E+02	2.808	+0.6686	8.6	1.0	100.0	m1100s08	SUS316	0.5
1.436E+03	4.161	+0.3429	8.6	1.0	100.0	m1100s09	SUS316	0.5
3.179E+01	2.869	+0.6267	7.4	2.0	5.0	m2005s01	SUS316	0.5
4.241E+01	3.019	+0.4580	7.5	2.0	5.0	m2005s02	SUS316	0.5
5.314E+01	3.143	+0.3517	7.7	2.0	5.0	m2005s03	SUS316	0.5
7.428E+01	3.331	+0.2257	8.1	2.0	5.0	m2005s04	SUS316	0.5
9.500E+01	3.571	+0.1614	8.1	2.0	5.0	m2005s05	SUS316	0.5
1.159E+02	3.641	+0.1063	7.9	2.0	5.0	m2005s06	SUS316	0.5
1.476E+02	3.898	+0.0620	7.9	2.0	5.0	m2005s07	SUS316	0.5
2.009E+02	4.511	+0.0284	8.7	2.0	5.0	m2005s08	SUS316	0.5
2.550E+02	5.348	+0.0181	10.2	2.0	5.0	m2005s09	SUS316	0.5

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
3.087E+02	5.965	+0.0041	10.5	2.0	5.0	m2005s10	SUS316	0.5
2.290E+02	4.625	+0.0103	9.7	2.0	5.0	m2005m01	SUS316	0.5
4.609E+01	1.949	+0.5849	12.0	2.0	10.0	m2010s01	SUS316	0.5
9.863E+01	3.223	+0.4149	12.1	2.0	10.0	m2010s02	SUS316	0.5
1.511E+02	4.003	+0.3057	12.2	2.0	10.0	m2010s03	SUS316	0.5
2.036E+02	4.423	+0.2195	11.4	2.0	10.0	m2010s04	SUS316	0.5
2.562E+02	4.613	+0.1541	11.7	2.0	10.0	m2010s05	SUS316	0.5
3.092E+02	4.857	+0.1134	11.7	2.0	10.0	m2010s06	SUS316	0.5
3.620E+02	4.977	+0.0787	11.7	2.0	10.0	m2010s07	SUS316	0.5
2.401E+02	4.691	+0.1824	12.3	2.0	10.0	m2010m01	SUS316	0.5
5.016E+02	5.308	+0.0237	12.3	2.0	10.0	m2010m02	SUS316	0.5
9.573E+01	1.582	+0.5649	10.3	2.0	25.0	m2025s02	SUS316	0.5
1.473E+02	2.229	+0.5028	10.3	2.0	25.0	m2025s03	SUS316	0.5
1.990E+02	2.799	+0.4553	10.2	2.0	25.0	m2025s04	SUS316	0.5
2.507E+02	3.113	+0.3823	10.2	2.0	25.0	m2025s05	SUS316	0.5
3.025E+02	3.451	+0.3376	10.1	2.0	25.0	m2025s06	SUS316	0.5
3.547E+02	3.714	+0.2962	10.2	2.0	25.0	m2025s07	SUS316	0.5
2.325E+02	2.784	+0.3637	10.7	2.0	25.0	m2025m01	SUS316	0.5
4.967E+02	4.199	+0.2087	11.2	2.0	25.0	m2025m02	SUS316	0.5
1.027E+03	5.411	+0.0691	12.0	2.0	25.0	m2025m03	SUS316	0.5
1.557E+03	5.991	+0.0068	12.4	2.0	25.0	m2025m04	SUS316	0.5
4.388E+01	.439	+0.7159	8.8	2.0	50.0	m2050s01	SUS316	0.5
9.639E+01	1.097	+0.8380	8.7	2.0	50.0	m2050s02	SUS316	0.5
1.490E+02	1.579	+0.7694	9.0	2.0	50.0	m2050s03	SUS316	0.5
2.014E+02	2.091	+0.7498	8.7	2.0	50.0	m2050s04	SUS316	0.5
2.543E+02	2.495	+0.6988	8.7	2.0	50.0	m2050s05	SUS316	0.5
3.071E+02	2.752	+0.6252	9.6	2.0	50.0	m2050s06	SUS316	0.5
3.597E+02	3.149	+0.6066	9.4	2.0	50.0	m2050s07	SUS316	0.5
2.261E+02	2.220	+0.7009	9.5	2.0	50.0	m2050m01	SUS316	0.5
4.859E+02	3.339	+0.4400	9.5	2.0	50.0	m2050m02	SUS316	0.5
1.016E+03	5.389	+0.3041	11.1	2.0	50.0	m2050m08	SUS316	0.5
8.445E+00	5.015	+0.8832	9.4	4.0	1.0	m4001s01	SUS316	1.0
1.105E+01	5.417	+0.7003	9.8	4.0	1.0	m4001s02	SUS316	1.0
1.373E+01	5.629	+0.5583	10.0	4.0	1.0	m4001s03	SUS316	1.0
1.634E+01	5.617	+0.4403	9.5	4.0	1.0	m4001s04	SUS316	1.0
1.905E+01	5.765	+0.3679	9.8	4.0	1.0	m4001s05	SUS316	1.0
2.431E+01	6.147	+0.2806	10.3	4.0	1.0	m4001s06	SUS316	1.0
2.941E+01	6.571	+0.2275	9.8	4.0	1.0	m4001s07	SUS316	1.0
3.736E+01	6.896	+0.1583	9.6	4.0	1.0	m4001s08	SUS316	1.0
5.051E+01	7.818	+0.1054	9.6	4.0	1.0	m4001s09	SUS316	1.0
6.364E+01	8.518	+0.0683	9.6	4.0	1.0	m4001s10	SUS316	1.0
7.676E+01	9.132	+0.0429	10.1	4.0	1.0	m4001s11	SUS316	1.0
8.995E+01	9.712	+0.0240	10.4	4.0	1.0	m4001s12	SUS316	1.0
5.702E+01	7.789	+0.0740	10.0	4.0	1.0	m4001m01	SUS316	1.0
1.147E+01	1.404	+0.9183	11.0	4.0	5.0	m4005s01	SUS316	1.0
2.466E+01	2.205	+0.6273	11.5	4.0	5.0	m4005s02	SUS316	1.0
3.785E+01	2.435	+0.4043	11.2	4.0	5.0	m4005s03	SUS316	1.0
5.095E+01	2.539	+0.2761	11.4	4.0	5.0	m4005s04	SUS316	1.0
6.417E+01	2.680	+0.2043	11.3	4.0	5.0	m4005s05	SUS316	1.0
7.751E+01	2.779	+0.1526	11.6	4.0	5.0	m4005s06	SUS316	1.0
9.058E+01	2.879	+0.1165	11.6	4.0	5.0	m4005s07	SUS316	1.0
5.955E+01	2.570	+0.2175	11.7	4.0	5.0	m4005m01	SUS316	1.0
1.244E+02	3.132	+0.0582	11.7	4.0	5.0	m4005m02	SUS316	1.0
1.100E+01	.572	+0.7531	9.8	4.0	10.0	m4010s01	SUS316	1.0
2.426E+01	1.217	+0.7210	9.9	4.0	10.0	m4010s02	SUS316	1.0
3.747E+01	1.579	+0.5786	9.9	4.0	10.0	m4010s03	SUS316	1.0
5.065E+01	1.774	+0.4528	10.1	4.0	10.0	m4010s04	SUS316	1.0
6.392E+01	1.976	+0.3810	10.6	4.0	10.0	m4010s05	SUS316	1.0
7.722E+01	2.106	+0.3174	11.1	4.0	10.0	m4010s06	SUS316	1.0
9.053E+01	2.226	+0.2704	11.5	4.0	10.0	m4010s07	SUS316	1.0
5.967E+01	1.823	+0.3771	12.0	4.0	10.0	m4010m01	SUS316	1.0
1.250E+02	2.355	+0.1694	11.9	4.0	10.0	m4010m02	SUS316	1.0
2.567E+02	3.091	+0.0500	12.5	4.0	10.0	m4010m03	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.855E+02	3.734	+0.0069	11.8	4.0	10.0	m4010m04	SUS316	1.0
1.129E+01	176	+0.5243	11.7	4.0	25.0	m4025s02	SUS316	1.0
2.365E+01	.399	+0.5787	9.5	4.0	25.0	m4025s03	SUS316	1.0
3.661E+01	.692	+0.6688	9.5	4.0	25.0	m4025s04	SUS316	1.0
4.958E+01	.964	+0.6922	9.3	4.0	25.0	m4025s05	SUS316	1.0
6.257E+01	1.142	+0.6398	9.6	4.0	25.0	m4025s06	SUS316	1.0
7.574E+01	1.291	+0.5871	9.9	4.0	25.0	m4025s07	SUS316	1.0
8.877E+01	1.468	+0.5661	10.8	4.0	25.0	m4025s08	SUS316	1.0
8.886E+01	1.447	+0.5546	10.7	4.0	25.0	m4025s09	SUS316	1.0
5.905E+01	.899	+0.5088	11.5	4.0	25.0	m4025m01	SUS316	1.0
1.252E+02	1.728	+0.4457	11.1	4.0	25.0	m4025m02	SUS316	1.0
2.578E+02	2.461	+0.2594	12.4	4.0	25.0	m4025m03	SUS316	1.0
3.898E+02	3.042	+0.1819	12.3	4.0	25.0	m4025m04	SUS316	1.0
5.213E+02	3.405	+0.1262	12.6	4.0	25.0	m4025m05	SUS316	1.0
5.861E+02	3.523	+0.1023	12.2	4.0	25.0	m4025m06	SUS316	1.0
6.626E+02	3.522	+0.0704	11.6	4.0	25.0	m4025l01	SUS316	1.0
1.054E+01	.104	+0.7011	7.4	4.0	50.0	m4050s02	SUS316	1.0
2.351E+01	.216	+0.6420	8.0	4.0	50.0	m4050s03	SUS316	1.0
3.630E+01	.359	+0.7056	8.5	4.0	50.0	m4050s04	SUS316	1.0
4.930E+01	.565	+0.8442	8.2	4.0	50.0	m4050s05	SUS316	1.0
6.214E+01	.737	+0.8798	8.1	4.0	50.0	m4050s06	SUS316	1.0
7.510E+01	.879	+0.8655	7.9	4.0	50.0	m4050s07	SUS316	1.0
8.831E+01	1.002	+0.8354	9.0	4.0	50.0	m4050s08	SUS316	1.0
6.199E+01	.736	+0.8814	8.3	4.0	50.0	m4050s10	SUS316	1.0
5.502E+01	.584	+0.7683	7.8	4.0	50.0	m4050m01	SUS316	1.0
1.215E+02	1.282	+0.7646	8.9	4.0	50.0	m4050m02	SUS316	1.0
2.550E+02	2.065	+0.5495	10.1	4.0	50.0	m4050m03	SUS316	1.0
3.873E+02	2.682	+0.4473	11.0	4.0	50.0	m4050m04	SUS316	1.0
5.200E+02	2.863	+0.3227	11.5	4.0	50.0	m4050m05	SUS316	1.0
5.855E+02	3.004	+0.2907	12.2	4.0	50.0	m4050m06	SUS316	1.0
6.627E+02	3.208	+0.2637	11.5	4.0	50.0	m4050l01	SUS316	1.0
1.325E+03	4.918	+0.1655	12.5	4.0	50.0	m4050l02	SUS316	1.0
1.987E+03	5.947	+0.1044	13.9	4.0	50.0	m4050l03	SUS316	1.0
2.650E+03	6.608	+0.0575	12.5	4.0	50.0	m4050l04	SUS316	1.0
3.312E+03	7.310	+0.0342	13.6	4.0	50.0	m4050l05	SUS316	1.0
3.975E+03	7.321	+0.0007	13.0	4.0	50.0	m4050l06	SUS316	1.0
3.974E+03	7.359	+0.0027	13.6	4.0	50.0	m4050l07	SUS316	1.0
7.238E+00	.883	+0.9110	9.3	6.0	5.0	m6005s02	SUS316	1.0
1.073E+01	1.125	+0.7609	10.1	6.0	5.0	m6005s03	SUS316	1.0
1.305E+01	1.223	+0.6625	9.9	6.0	5.0	m6005s04	SUS316	1.0
1.656E+01	1.352	+0.5544	9.3	6.0	5.0	m6005s05	SUS316	1.0
2.240E+01	1.460	+0.4091	9.8	6.0	5.0	m6005s06	SUS316	1.0
2.832E+01	1.552	+0.3177	10.2	6.0	5.0	m6005s07	SUS316	1.0
3.421E+01	1.657	+0.2617	10.3	6.0	5.0	m6005s08	SUS316	1.0
4.012E+01	1.742	+0.2182	10.8	6.0	5.0	m6005s09	SUS316	1.0
2.615E+01	1.534	+0.3542	11.2	6.0	5.0	m6005m01	SUS316	1.0
5.536E+01	1.859	+0.1330	11.9	6.0	5.0	m6005m02	SUS316	1.0
8.478E+01	2.123	+0.0581	12.3	6.0	5.0	m6005m03	SUS316	1.0
1.143E+02	2.380	+0.0216	12.8	6.0	5.0	m6005m04	SUS316	1.0
1.436E+02	2.761	+0.0088	13.5	6.0	5.0	m6005m05	SUS316	1.0
5.331E+00	.338	+0.9602	12.5	6.0	10.0	m6010s01	SUS316	1.0
1.115E+01	.635	+0.8466	13.0	6.0	10.0	m6010s02	SUS316	1.0
1.699E+01	.863	+0.7374	12.6	6.0	10.0	m6010s03	SUS316	1.0
2.283E+01	.987	+0.6034	13.0	6.0	10.0	m6010s04	SUS316	1.0
2.870E+01	1.104	+0.5184	12.6	6.0	10.0	m6010s05	SUS316	1.0
3.452E+01	1.166	+0.4367	13.4	6.0	10.0	m6010s06	SUS316	1.0
4.036E+01	1.232	+0.3772	12.4	6.0	10.0	m6010s07	SUS316	1.0
2.684E+01	.999	+0.4963	12.5	6.0	10.0	m6010m01	SUS316	1.0
5.598E+01	1.402	+0.2814	13.0	6.0	10.0	m6010m02	SUS316	1.0
1.141E+02	1.724	+0.1051	12.9	6.0	10.0	m6010m03	SUS316	1.0
1.721E+02	2.102	+0.0533	12.7	6.0	10.0	m6010m04	SUS316	1.0
2.306E+02	2.373	+0.0189	12.5	6.0	10.0	m6010m05	SUS316	1.0
2.588E+02	2.533	+0.0100	12.5	6.0	10.0	m6010m06	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Material	Thickness [mm]
1.028E+01	180	+0.6008	7.2	6.0	25.0	m6025s03	SUS316	1.0
1.596E+01	.310	+0.6871	7.3	6.0	25.0	m6025s04	SUS316	1.0
2.174E+01	.440	+0.7239	7.5	6.0	25.0	m6025s05	SUS316	1.0
2.746E+01	.519	+0.6631	7.0	6.0	25.0	m6025s06	SUS316	1.0
3.317E+01	.595	+0.6233	8.1	6.0	25.0	m6025s07	SUS316	1.0
3.894E+01	.671	+0.5909	7.6	6.0	25.0	m6025s08	SUS316	1.0
2.451E+01	.442	+0.6276	8.3	6.0	25.0	m6025m01	SUS316	1.0
5.425E+01	.908	+0.5707	8.7	6.0	25.0	m6025m02	SUS316	1.0
8.365E+01	1.205	+0.4702	10.1	6.0	25.0	m6025m03	SUS316	1.0
1.134E+02	1.402	+0.3796	9.9	6.0	25.0	m6025m04	SUS316	1.0
1.721E+02	1.931	+0.3307	10.9	6.0	25.0	m6025m05	SUS316	1.0
2.313E+02	1.932	+0.2055	11.9	6.0	25.0	m6025m06	SUS316	1.0
2.602E+02	2.150	+0.2011	11.7	6.0	25.0	m6025m07	SUS316	1.0
1.727E+02	1.607	+0.2480	12.0	6.0	25.0	m6025m08	SUS316	1.0
2.311E+02	2.010	+0.2202	11.6	6.0	25.0	m6025m09	SUS316	1.0
2.945E+02	2.222	+0.1692	11.6	6.0	25.0	m6025l01	SUS316	1.0
5.889E+02	2.867	+0.0536	13.2	6.0	25.0	m6025l02	SUS316	1.0
1.059E+01	.111	+0.7599	8.5	6.0	50.0	m6050s22	SUS316	1.0
1.647E+01	.184	+0.8195	9.0	6.0	50.0	m6050s23	SUS316	1.0
2.238E+01	.252	+0.8267	9.2	6.0	50.0	m6050s24	SUS316	1.0
2.828E+01	.328	+0.8590	9.7	6.0	50.0	m6050s25	SUS316	1.0
3.419E+01	.403	+0.8761	9.8	6.0	50.0	m6050s26	SUS316	1.0
4.008E+01	.474	+0.8801	10.6	6.0	50.0	m6050s27	SUS316	1.0
2.582E+01	.280	+0.7948	10.6	6.0	50.0	m6050m21	SUS316	1.0
5.517E+01	.646	+0.8724	11.3	6.0	50.0	m6050m22	SUS316	1.0
1.134E+02	1.134	+0.7220	12.2	6.0	50.0	m6050m23	SUS316	1.0
1.724E+02	1.489	+0.6023	12.9	6.0	50.0	m6050m24	SUS316	1.0
2.302E+02	1.824	+0.5398	12.9	6.0	50.0	m6050m25	SUS316	1.0
2.595E+02	1.977	+0.5117	12.5	6.0	50.0	m6050m26	SUS316	1.0
8.557E+01	.954	+0.8269	13.6	6.0	50.0	m6050m27	SUS316	1.0
1.432E+02	1.336	+0.6641	13.0	6.0	50.0	m6050m28	SUS316	1.0
2.934E+02	2.124	+0.4786	12.7	6.0	50.0	m6050l21	SUS316	1.0
5.836E+02	2.992	+0.2935	13.9	6.0	50.0	m6050l22	SUS316	1.0
8.753E+02	3.954	+0.2422	15.4	6.0	50.0	m6050l23	SUS316	1.0
1.173E+03	4.581	+0.1899	16.3	6.0	50.0	m6050l24	SUS316	1.0
4.085E+02	2.671	+0.4163	12.7	6.0	50.0	m6050l25	SUS316	1.0
7.000E+02	3.510	+0.2845	14.4	6.0	50.0	m6050l26	SUS316	1.0

Table 2.8 Group B-3 [Xex < 0]

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
3.004E+02	4.659	-0.0204	15.5	6.0	5.0	k6005i01	SUS316	1.0
2.991E+02	4.940	-0.0026	20.3	6.0	5.0	k6005i02	SUS316	1.0
4.996E+02	6.283	-0.0412	18.3	6.0	5.0	k6005j01	SUS316	1.0
5.002E+02	6.299	-0.0382	19.8	6.0	5.0	k6005j02	SUS316	1.0
5.001E+02	6.213	-0.0399	19.7	6.0	5.0	k6005j03	SUS316	1.0
4.990E+02	6.078	-0.0338	24.1	6.0	5.0	k6005j04	SUS316	1.0
5.002E+02	6.007	-0.0329	25.4	6.0	5.0	k6005j05	SUS316	1.0
4.993E+02	5.826	-0.0259	30.8	6.0	5.0	k6005j06	SUS316	1.0
5.004E+02	6.005	-0.0227	30.9	6.0	5.0	k6005j07	SUS316	1.0
4.995E+02	5.713	-0.0191	35.5	6.0	5.0	k6005j08	SUS316	1.0
4.988E+02	5.572	-0.0105	41.4	6.0	5.0	k6005j09	SUS316	1.0
5.006E+02	5.306	-0.0086	45.1	6.0	5.0	k6005j10	SUS316	1.0
5.999E+02	7.346	-0.0452	17.7	6.0	5.0	k6005k01	SUS316	1.0
5.996E+02	7.180	-0.0422	20.6	6.0	5.0	k6005k02	SUS316	1.0
5.978E+02	7.007	-0.0351	25.6	6.0	5.0	k6005k03	SUS316	1.0
5.991E+02	6.551	-0.0326	30.7	6.0	5.0	k6005k04	SUS316	1.0
5.975E+02	6.545	-0.0230	35.7	6.0	5.0	k6005k05	SUS316	1.0
6.003E+02	6.321	-0.0186	40.1	6.0	5.0	k6005k06	SUS316	1.0
5.986E+02	6.136	-0.0110	45.5	6.0	5.0	k6005k07	SUS316	1.0
6.003E+02	5.644	-0.0097	50.2	6.0	5.0	k6005k08	SUS316	1.0
8.007E+02	9.381	-0.0477	18.9	6.0	5.0	k6005l01	SUS316	1.0
8.024E+02	9.455	-0.0471	18.9	6.0	5.0	k6005l02	SUS316	1.0
8.003E+02	9.050	-0.0397	25.1	6.0	5.0	k6005l03	SUS316	1.0
8.025E+02	8.503	-0.0365	30.2	6.0	5.0	k6005l04	SUS316	1.0
8.021E+02	8.526	-0.0351	30.8	6.0	5.0	k6005l05	SUS316	1.0
8.014E+02	8.029	-0.0326	35.0	6.0	5.0	k6005l06	SUS316	1.0
7.988E+02	7.389	-0.0301	40.0	6.0	5.0	k6005l07	SUS316	1.0
7.977E+02	7.362	-0.0200	45.5	6.0	5.0	k6005l08	SUS316	1.0
7.988E+02	7.551	-0.0096	50.0	6.0	5.0	k6005l09	SUS316	1.0
7.993E+02	7.444	-0.0025	54.5	6.0	5.0	k6005l10	SUS316	1.0
1.004E+03	11.52	-0.0493	19.2	6.0	5.0	k6005m01	SUS316	1.0
1.002E+03	10.73	-0.0534	20.6	6.0	5.0	k6005m02	SUS316	1.0
1.001E+03	10.33	-0.0477	25.5	6.0	5.0	k6005m03	SUS316	1.0
1.001E+03	9.556	-0.0463	29.9	6.0	5.0	k6005m04	SUS316	1.0
1.001E+03	9.250	-0.0392	35.2	6.0	5.0	k6005m05	SUS316	1.0
9.991E+02	8.644	-0.0358	39.8	6.0	5.0	k6005m06	SUS316	1.0
1.000E+03	7.031	-0.0414	44.5	6.0	5.0	k6005m07	SUS316	1.0
1.001E+03	7.854	-0.0241	49.9	6.0	5.0	k6005m08	SUS316	1.0
1.003E+03	6.750	-0.0237	55.4	6.0	5.0	k6005m09	SUS316	1.0
1.000E+03	5.974	-0.0218	60.0	6.0	5.0	k6005m10	SUS316	1.0
9.994E+02	5.672	-0.0162	64.4	6.0	5.0	k6005m11	SUS316	1.0
1.000E+03	5.617	-0.0063	70.0	6.0	5.0	k6005m12	SUS316	1.0
1.502E+03	14.70	-0.0621	20.3	6.0	5.0	k6005n02	SUS316	1.0
1.502E+03	14.04	-0.0556	25.9	6.0	5.0	k6005n03	SUS316	1.0
1.508E+03	12.52	-0.0592	28.9	6.0	5.0	k6005n04	SUS316	1.0
1.503E+03	11.91	-0.0518	34.7	6.0	5.0	k6005n05	SUS316	1.0
1.502E+03	11.06	-0.0573	34.4	6.0	5.0	k6005n06	SUS316	1.0
1.503E+03	10.27	-0.0502	40.7	6.0	5.0	k6005n07	SUS316	1.0
1.500E+03	10.41	-0.0429	44.1	6.0	5.0	k6005n08	SUS316	1.0
1.501E+03	9.899	-0.0370	48.9	6.0	5.0	k6005n09	SUS316	1.0
1.499E+03	9.503	-0.0279	55.0	6.0	5.0	k6005n10	SUS316	1.0
1.504E+03	9.656	-0.0191	59.3	6.0	5.0	k6005n11	SUS316	1.0
1.499E+03	9.646	-0.0110	63.6	6.0	5.0	k6005n12	SUS316	1.0
1.500E+03	8.577	-0.0054	70.0	6.0	5.0	k6005n14	SUS316	1.0
1.498E+03	7.084	-0.0044	75.2	6.0	5.0	k6005n15	SUS316	1.0
1.798E+03	16.56	-0.0775	14.8	6.0	5.0	k6005o01	SUS316	1.0
1.799E+03	17.39	-0.0752	13.9	6.0	5.0	k6005o02	SUS316	1.0
1.806E+03	16.56	-0.0659	21.2	6.0	5.0	k6005o03	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [°]	D [mm]	L/D [-]	Run No	Mate- rial	Thickness [mm]
1.794E+03	16.01	-0.0597	25.7	6.0	5.0	k6005o04	SUS316	1.0
1.785E+03	15.02	-0.0510	32.8	6.0	5.0	k6005o05	SUS316	1.0
1.783E+03	14.62	-0.0421	38.6	6.0	5.0	k6005o06	SUS316	1.0
1.783E+03	12.57	-0.0444	42.8	6.0	5.0	k6005o07	SUS316	1.0
1.784E+03	11.01	-0.0485	44.8	6.0	5.0	k6005o08	SUS316	1.0
1.802E+03	11.58	-0.0359	50.3	6.0	5.0	k6005o09	SUS316	1.0
1.802E+03	8.604	-0.0438	53.9	6.0	5.0	k6005o11	SUS316	1.0
1.801E+03	8.068	-0.0352	59.9	6.0	5.0	k6005o12	SUS316	1.0
1.807E+03	7.350	-0.0288	65.3	6.0	5.0	k6005o13	SUS316	1.0
1.803E+03	7.092	-0.0214	69.9	6.0	5.0	k6005o14	SUS316	1.0
1.805E+03	6.524	-0.0149	74.9	6.0	5.0	k6005o15	SUS316	1.0
1.012E+03	14.43	-0.0408	10.5	2.2	5.0	ks10dh01	Nickel	0.5
2.006E+03	21.25	-0.0729	10.7	2.2	5.0	ks10dh02	Nickel	0.5
7.966E+02	14.07	-0.0099	10.9	2.2	5.0	ks10gl06	Nickel	0.5
1.312E+04	61.28	-0.1200	13.6	2.2	5.0	ks10gh03	Nickel	0.5
4.992E+03	38.12	-0.0941	13.4	2.2	5.0	ks10gh04	Nickel	0.5
8.054E+03	50.34	-0.1055	13.9	2.2	5.0	ks10gh05	Nickel	0.5
1.007E+04	62.80	-0.1048	14.3	2.2	5.0	ks10gh06	Nickel	0.5
3.013E+03	33.09	-0.0652	13.0	2.2	5.0	ks10gh07	Nickel	0.5
1.493E+03	24.13	-0.0208	12.2	2.2	5.0	ks10gh08	Nickel	0.5
1.007E+03	17.15	-0.0150	11.2	2.2	5.0	ks10gh09	Nickel	0.5
2.023E+03	13.09	-0.0495	12.1	2.2	10.0	ks10ch02	Nickel	0.5
7.061E+03	22.71	-0.1085	11.4	2.2	10.0	ks10ch04	Nickel	0.5
1.017E+04	33.13	-0.1053	12.7	2.2	10.0	ks10ch05	Nickel	0.5
1.331E+04	44.12	-0.1010	14.5	2.2	10.0	ks10ch06	Nickel	0.5
1.476E+03	10.56	-0.0382	11.7	2.2	10.0	ks10ch07	Nickel	0.5
2.996E+03	21.09	-0.0408	11.4	2.2	10.0	ks10ch08	Nickel	0.5
5.024E+03	27.19	-0.0688	11.8	2.2	10.0	ks10ch09	Nickel	0.5
8.007E+03	34.06	-0.0884	12.3	2.2	10.0	ks10ch10	Nickel	0.5
9.053E+03	35.10	-0.0929	13.5	2.2	10.0	ks10ch11	Nickel	0.5
1.108E+04	38.22	-0.1014	13.0	2.2	10.0	ks10ch12	Nickel	0.5
1.210E+04	40.14	-0.1026	13.6	2.2	10.0	ks10ch13	Nickel	0.5
6.018E+03	27.33	-0.0830	12.5	2.2	10.0	ks10ch14	Nickel	0.5
4.917E+03	8.239	-0.0089	13.5	2.2	51.4	ks10eh21	Nickel	0.5
5.983E+03	8.763	-0.0311	11.9	2.2	51.4	ks10eh22	Nickel	0.5
7.156E+03	10.41	-0.0306	12.7	2.2	51.4	ks10eh23	Nickel	0.5
1.328E+04	13.57	-0.0649	15.4	2.2	51.4	ks10eh24	Nickel	0.5
2.980E+02	4.567	-0.0286	12.0	4.0	5.0	ks104a06	Nickel	0.25
4.000E+02	5.548	-0.0422	11.6	4.0	5.0	ks104a07	Nickel	0.25
9.935E+02	3.002	-0.0272	13.8	4.0	25.0	ks104c03	Nickel	0.25
2.001E+03	5.279	-0.0450	13.3	4.0	25.0	ks104c04	Nickel	0.25
1.990E+02	3.714	-0.0011	10.9	6.0	5.0	ks106a03	Nickel	1.0
4.022E+02	5.595	-0.0409	12.1	6.0	5.0	ks106a04	Nickel	1.0
3.985E+02	3.460	-0.0077	13.5	6.0	10.0	ks106b25	Nickel	1.0
4.985E+02	4.046	-0.0168	14.0	6.0	10.0	ks106b36	Nickel	1.0
1.962E+03	6.397	-0.0130	15.7	6.0	25.0	ks106c35	Nickel	1.0
1.494E+03	5.222	-0.0041	14.9	6.0	25.0	ks106c37	Nickel	1.0
1.445E+03	25.05	-0.0131	10.7	1.0	5.0	m1005s07	SUS316	0.5
1.975E+03	32.99	-0.0173	11.5	1.0	5.0	m1005m02	SUS316	0.5
4.058E+03	46.09	-0.0645	11.6	1.0	5.0	m1005m03	SUS316	0.5
6.155E+03	62.73	-0.0737	12.2	1.0	5.0	m1005m04	SUS316	0.5
8.273E+03	92.83	-0.0638	12.6	1.0	5.0	m1005m05	SUS316	0.5
1.913E+04	158.1	-0.0777	19.2	1.0	5.0	m1005l01	SUS316	0.5
1.228E+03	9.884	-0.0125	9.3	1.0	11.0	m1010s06	SUS316	0.5
1.438E+03	10.11	-0.0322	9.4	1.0	11.0	m1010s07	SUS316	0.5
1.233E+03	9.046	-0.0247	10.2	1.0	11.0	m1010s09	SUS316	0.5
8.892E+02	7.323	-0.0100	8.7	1.0	11.0	m1010m01	SUS316	0.5
1.943E+03	10.72	-0.0609	9.8	1.0	11.0	m1010m02	SUS316	0.5
4.075E+03	19.03	-0.0739	11.7	1.0	11.0	m1010m03	SUS316	0.5
6.179E+03	28.89	-0.0723	12.5	1.0	11.0	m1010m04	SUS316	0.5
6.222E+03	22.16	-0.0071	11.7	1.0	25.0	m1025m04	SUS316	0.5
8.337E+03	27.01	-0.0210	11.9	1.0	25.0	m1025m05	SUS316	0.5
3.620E+02	5.903	-0.0221	10.8	2.0	5.0	m2005s11	SUS316	0.5

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
4.892E+02	6.137	-0.0570	10.0	2.0	5.0	m2005m02	SUS316	0.5
7.534E+02	6.796	-0.0871	10.6	2.0	5.0	m2005m03	SUS316	0.5
1.017E+03	8.457	-0.0922	11.2	2.0	5.0	m2005m04	SUS316	0.5
1.283E+03	9.710	-0.0975	11.9	2.0	5.0	m2005m05	SUS316	0.5
1.545E+03	10.59	-0.1033	12.2	2.0	5.0	m2005m06	SUS316	0.5
2.065E+03	14.72	-0.1007	12.3	2.0	5.0	m2005m07	SUS316	0.5
1.565E+04	38.67	-0.1395	13.6	2.0	5.0	m2005l01	SUS316	0.5
1.025E+03	7.525	-0.0331	12.6	2.0	10.0	m2010m03	SUS316	0.5
1.552E+03	9.298	-0.0563	13.0	2.0	10.0	m2010m04	SUS316	0.5
2.073E+03	11.27	-0.0664	12.9	2.0	10.0	m2010m05	SUS316	0.5
2.341E+03	11.91	-0.0720	13.2	2.0	10.0	m2010m06	SUS316	0.5
2.641E+03	13.14	-0.0739	13.2	2.0	10.0	m2010l01	SUS316	0.5
5.229E+03	19.36	-0.0989	11.9	2.0	10.0	m2010l02	SUS316	0.5
7.827E+03	23.26	-0.1114	12.2	2.0	10.0	m2010l03	SUS316	0.5
1.047E+04	26.70	-0.1162	13.6	2.0	10.0	m2010l04	SUS316	0.5
2.085E+03	6.919	-0.0170	12.2	2.0	25.0	m2025m05	SUS316	0.5
2.353E+03	7.392	-0.0237	12.8	2.0	25.0	m2025m06	SUS316	0.5
2.650E+03	8.010	-0.0282	13.2	2.0	25.0	m2025l01	SUS316	0.5
5.299E+03	13.28	-0.0502	13.7	2.0	25.0	m2025l02	SUS316	0.5
1.222E+02	10.47	-0.0166	9.8	4.0	1.0	m4001m02	SUS316	1.0
1.481E+02	10.97	-0.0359	10.5	4.0	1.0	m4001m03	SUS316	1.0
1.877E+02	11.98	-0.0540	10.5	4.0	1.0	m4001m04	SUS316	1.0
2.541E+02	13.95	-0.0684	11.3	4.0	1.0	m4001m05	SUS316	1.0
3.221E+02	15.51	-0.0775	12.8	4.0	1.0	m4001m06	SUS316	1.0
3.855E+02	16.39	-0.0889	12.1	4.0	1.0	m4001m07	SUS316	1.0
4.493E+02	17.49	-0.0960	11.7	4.0	1.0	m4001m08	SUS316	1.0
5.150E+02	17.75	-0.1035	11.9	4.0	1.0	m4001m09	SUS316	1.0
5.818E+02	18.34	-0.1076	12.5	4.0	1.0	m4001m10	SUS316	1.0
6.595E+02	21.46	-0.1065	12.1	4.0	1.0	m4001l01	SUS316	1.0
9.188E+02	24.64	-0.1161	12.4	4.0	1.0	m4001l02	SUS316	1.0
1.305E+03	25.96	-0.1293	11.9	4.0	1.0	m4001l03	SUS316	1.0
3.891E+03	38.80	-0.1473	11.7	4.0	1.0	m4001l04	SUS316	1.0
2.611E+03	35.69	-0.1366	13.9	4.0	1.0	m4001l05	SUS316	1.0
2.554E+02	4.314	-0.0149	11.9	4.0	5.0	m4005m03	SUS316	1.0
3.864E+02	5.634	-0.0354	11.9	4.0	5.0	m4005m04	SUS316	1.0
5.184E+02	6.885	-0.0454	12.7	4.0	5.0	m4005m05	SUS316	1.0
5.821E+02	7.371	-0.0514	12.4	4.0	5.0	m4005m06	SUS316	1.0
6.600E+02	7.925	-0.0569	12.6	4.0	5.0	m4005l01	SUS316	1.0
1.309E+03	11.84	-0.0820	13.2	4.0	5.0	m4005l02	SUS316	1.0
1.958E+03	14.18	-0.0982	13.1	4.0	5.0	m4005l03	SUS316	1.0
3.912E+03	22.40	-0.1107	13.6	4.0	5.0	m4005l06	SUS316	1.0
5.171E+02	4.117	-0.0214	13.0	4.0	10.0	m4010m05	SUS316	1.0
5.818E+02	4.450	-0.0279	12.5	4.0	10.0	m4010m06	SUS316	1.0
6.600E+02	4.724	-0.0351	13.3	4.0	10.0	m4010l01	SUS316	1.0
1.307E+03	7.518	-0.0610	12.8	4.0	10.0	m4010l02	SUS316	1.0
1.951E+03	10.29	-0.0712	11.8	4.0	10.0	m4010l03	SUS316	1.0
3.914E+03	16.06	-0.0894	13.2	4.0	10.0	m4010l06	SUS316	1.0
1.325E+03	4.118	-0.0243	13.3	4.0	25.0	m4025l02	SUS316	1.0
1.987E+03	5.212	-0.0441	14.2	4.0	25.0	m4025l03	SUS316	1.0
2.649E+03	6.269	-0.0536	15.2	4.0	25.0	m4025l04	SUS316	1.0
3.311E+03	7.293	-0.0604	15.4	4.0	25.0	m4025l05	SUS316	1.0
3.973E+03	8.360	-0.0644	15.6	4.0	25.0	m4025l06	SUS316	1.0
3.312E+03	7.318	-0.0626	14.1	4.0	25.0	m4025l07	SUS316	1.0
1.701E+02	2.985	-0.0113	10.7	6.0	5.0	m6005m06	SUS316	1.0
2.293E+02	3.661	-0.0231	11.9	6.0	5.0	m6005m07	SUS316	1.0
2.590E+02	3.980	-0.0276	12.3	6.0	5.0	m6005m08	SUS316	1.0
2.934E+02	4.459	-0.0284	12.7	6.0	5.0	m6005l01	SUS316	1.0
4.092E+02	5.663	-0.0389	13.5	6.0	5.0	m6005l02	SUS316	1.0
5.837E+02	7.032	-0.0535	14.2	6.0	5.0	m6005l03	SUS316	1.0
6.998E+02	7.848	-0.0605	14.4	6.0	5.0	m6005l04	SUS316	1.0
8.766E+02	8.703	-0.0702	15.3	6.0	5.0	m6005l05	SUS316	1.0
1.173E+03	9.907	-0.0810	16.6	6.0	5.0	m6005l06	SUS316	1.0
1.466E+03	11.23	-0.0872	17.0	6.0	5.0	m6005l07	SUS316	1.0

G [kg/m ² s]	CHF [MW/m ²]	X _{ex} [-]	T _{in} [C]	D [mm]	L/D [-]	Run No.	Mate- rial	Thickness [mm]
1.754E+03	12.39	-0.0951	15.6	6.0	5.0	m6005l08	SUS316	1.0
2.933E+02	2.563	-0.0090	12.3	6.0	10.0	m6010l01	SUS316	1.0
5.815E+02	4.304	-0.0319	12.7	6.0	10.0	m6010l02	SUS316	1.0
8.716E+02	5.604	-0.0480	13.3	6.0	10.0	m6010l03	SUS316	1.0
1.159E+03	6.702	-0.0604	12.8	6.0	10.0	m6010l04	SUS316	1.0
8.833E+02	3.129	-0.0052	13.2	6.0	25.0	m6025l03	SUS316	1.0
1.178E+03	3.608	-0.0243	14.3	6.0	25.0	m6025l04	SUS316	1.0
1.472E+03	4.051	-0.0395	13.6	6.0	25.0	m6025l05	SUS316	1.0
1.766E+03	4.541	-0.0475	13.6	6.0	25.0	m6025l06	SUS316	1.0
1.178E+03	3.600	-0.0275	12.8	6.0	25.0	m6025l07	SUS316	1.0

Appendix B

COMPARISON BETWEEN PRESENT DATA AND
THE EXISTING CORRELATIONS AND MODELS

INTRODUCTION

The experimental data were compared with several existing correlations and models and their applicability was examined. Some of them presented good agreement with the present data in a limited ranges. In this appendix, applicability to small-diameter tubes was listed up.

APPLICABILITY OF THE EXISTING CORRELATIONS AND
MODELS TO SMALL-DIAMETER TUBES

Star, ★, means the applicability. Five ★ mean a very good agreement with the present data.

PRESSURE DROP

- (1-1) ΔP_f =Martinelli-Nelson, ΔP_a =Homogeneous Flow Model
★★ : Overestimate the ΔP
- (1-2) ΔP_f =Martinelli-Nelson, ΔP_a =Separated Flow Model(α =Smith)
★★★★★
- (1-3) Akagawa correlation
★★★★★ : Overestimate the ΔP

HEAT TRANSFER

- (2-1) Nu =4.0 (TRAC-PF1, TRAC-BF1)
★★ : Overestimate the wall temperature
- (2-2) Nu =4.36 (RELAP5/MOD2)
★★ : Overestimate the wall temperature
- (2-3) Collier correlation
★★★ : Underestimate the wall temperature

(2-4) Dittus-Boelter correlation

★★★★ : Overestimate the wall temperature at low Re condition

(2-5) Deissler correlation

★★ : Underestimate the wall temperature

(2-6) Petukov correlation

★★ : Underestimate the wall temperature

(2-7) Gnielinski correlation

★ : Underestimate the wall temperature

(2-8) Sleicher-Rouse correlation

★★ : Underestimate the wall temperature

(2-9) Bergles-Rohsenow correlation

★★★ : Overestimate the wall temperature

(2-10) Dengler-Addams correlation

★ : Overestimate the wall temperature at $X_{ex} \doteq 0$ condition

(2-11) Shar correlation

★ : Underestimate the wall temperature at high Re condition

(2-12) Chen correlation

★ : Underestimate the wall temperature at high Re condition

(2-13) Sani correlation

★ : Underestimate the wall temperature at high Re condition

(2-14) Mixture model

★★ : Underestimate the wall temperature for small-diameter tubes

(2-15) Jens-Lottes correlation

★★ : Underestimate the wall temperature at high Re condition

(2-16) Thom correlation

★★ : Underestimate the wall temperature at high Re condition

DRYOUT TYPE BURNOUT

(3-1) Macbeth correlation

★★★ : Overestimate the CHF without the data of the very small L/D tubes

(3-2) Katto correlation

★★ : Overestimate the CHF without the data of the very small L/D tubes

(3-3) Lowdermilk correlation

★★★★ : Underestimate the CHF for the data of the very small L/D tubes

(3-4) FIDAS code

★★★ : Underestimate the CHF for small L/D tubes

DNB TYPE BURNOUT

(4-1) Knoebel correlation

★ : Underestimate the CHF

(4-2) Griffel correlation

★ : Underestimate the CHF

(4-3) Zenkevich correlation

★★★★★ : Good agreement with the data

(4-4) Mirshak correlation

★ : Underestimate the CHF

(4-5) Inasaka correlation

★★★ : Underestimate the CHF

(4-6) Celata correlation

★★★ : Underestimate the CHF

(4-7) Vandervolt correlation

★★ : Low predicting accuracy

(4-8) Katto model

★★ : Overestimate the CHF

(4-9) Celata model

★★★★★ : Good agreement with the data at $L/D \geq 25$

(4-10) Weisman-Pei model

★★★ : Overestimate the CHF

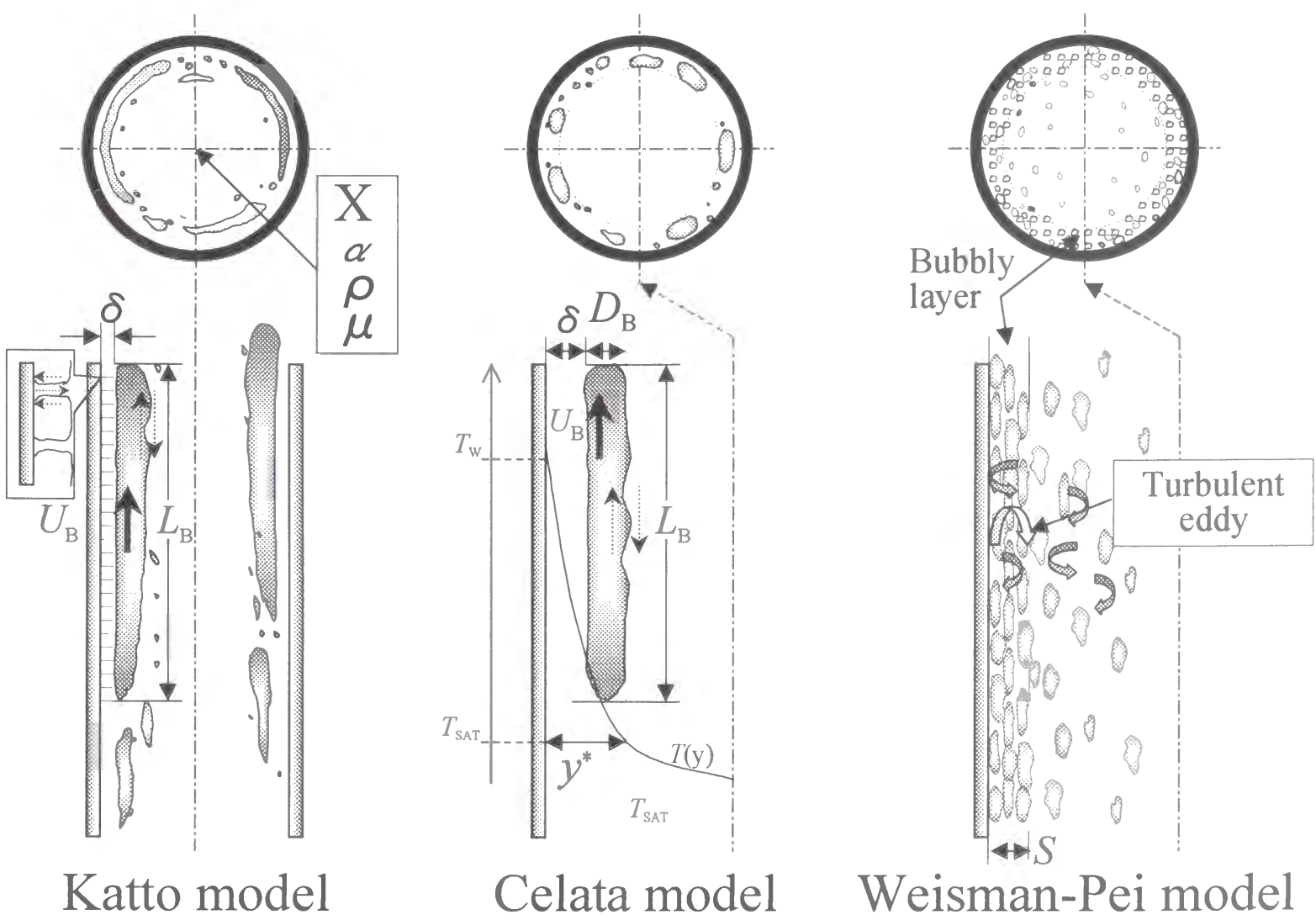


Figure Conceptual view of the DNB type burnout models